

30.08.00

日本国特許庁

PATENT OFFICE  
JAPANESE GOVERNMENT

REC'D 20 OCT 2000

WIPO

PCT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日

Date of Application:

1999年 9月13日

EQU

出願番号

Application Number:

平成11年特許願第259615号

出願人

Applicant(s):

株式会社ニコン

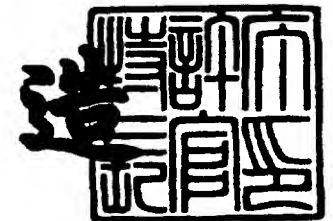
09/831345

PRIORITY  
DOCUMENTSUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2000年10月 6日

特許庁長官  
Commissioner,  
Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2000-3080885

【書類名】 特許願  
 【整理番号】 99-00995  
 【あて先】 特許庁長官殿  
 【国際特許分類】 H01L 21/027  
 【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社 ニコ

ン内

【氏名】 大槻 朋子

【特許出願人】

【識別番号】 000004112

【氏名又は名称】 株式会社 ニコン

【代理人】

【識別番号】 100102901

【弁理士】

【氏名又は名称】 立石 篤司

【電話番号】 042-739-6625

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 053132

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9408046

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 波長安定化制御方法及び光源装置、露光方法及び露光装置、並びにデバイス製造方法及びデバイス

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 レーザ光源から発振されるレーザ光の中心波長を所定の設定波長に維持するための波長安定化制御方法であって、

---

前記レーザ光の波長を検出する波長検出装置の検出基準波長の温度依存性を予め測定する第 1 工程と；

前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源から提供される絶対波長に対して前記波長検出装置の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行う第 2 工程と；

前記第 1 工程で求めた前記温度依存性に基づいて、前記波長検出装置の前記検出基準波長を前記設定波長に設定する第 3 工程とを含む波長安定化制御方法。

【請求項 2】 前記波長検出装置は、ファブリペロー・エタロンであり、

前記第 1 工程で前記波長検出装置の共鳴波長の温度依存性を測定し、

前記第 2 工程で前記波長検出装置の温度を制御することにより前記共鳴波長を前記絶対波長にほぼ一致させ、

前記第 3 工程で前記波長検出装置の温度を制御することにより前記共鳴波長を前記設定波長に設定することを特徴とする請求項 1 に記載の波長安定化制御方法。

。

【請求項 3】 前記絶対波長提供源は、前記レーザ光が入射する吸収セルであり、

前記第 2 工程では、前記吸収セルの前記設定波長に最も近い吸収線の吸収が最大となり、かつ前記波長検出装置の透過率が最大となるようにすることを特徴とする請求項 2 に記載の波長安定化制御方法。

【請求項 4】 前記第 1 工程では前記レーザ光の中心波長の温度依存性をも予め計測し、

前記第 2 工程では、前記レーザ光の波長制御をも併せて行うことを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれか一項に記載の波長安定化制御方法。

【請求項 5】 前記第 3 工程で前記検出基準波長が前記設定波長に設定された前記波長検出装置の検出結果に基づいて前記レーザ光源からの前記レーザ光の波長を制御する第 4 工程を更に含むことを特徴とする請求項 1～4 のいずれか一項に記載の波長安定化制御方法。

【請求項 6】 前記レーザ光の波長制御は、前記レーザ光源の温度、供給電流の少なくとも一方を制御することにより行うことを特徴とする請求項 4 又は 5 に記載の波長安定化制御方法。

【請求項 7】 レーザ光を発振するレーザ光源と；

前記レーザ光の中心波長を所定の設定波長に維持するための波長安定化に関連する前記レーザ光の光学特性をモニタするビームモニタ機構と；

前記ビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性のデータを含む温度依存性マップが記憶された記憶装置と；

前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源と；

前記絶対波長提供源から提供される絶対波長に対して前記ビームモニタ機構の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行うとともに、前記温度依存性マップに基づいて前記検出基準波長を前記設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションを行う第 1 の制御装置とを備える光源装置。

【請求項 8】 前記ビームモニタ機構は、ファブリペロー・エタロンを含み、

前記温度依存性マップは、前記ファブリペロー・エタロンの共鳴波長の温度依存性の測定結果に基づくデータを含み、

前記第 1 の制御装置は、前記ビームモニタ機構を構成する前記ファブリペロー・エタロンの温度を制御することにより、前記検出基準波長の前記絶対波長キャリブレーション及び前記設定波長キャリブレーションを行うことを特徴とする請求項 7 に記載の光源装置。

【請求項 9】 前記温度依存性マップは、前記レーザ光源から発振される前記レーザ光の中心波長の温度依存性のデータを更に含み、

前記第 1 の制御装置は、前記絶対波長キャリブレーションを行うに際し、前記レーザ光源の波長制御をも併せて行うことを特徴とする請求項 8 に記載の光源装



置。

【請求項 1 0】 前記絶対波長提供源は、前記レーザ光が入射する吸収セルであり、

前記第 1 の制御装置は、前記絶対波長キャリブレーションを行う際に、前記吸収セルの前記設定波長に最も近い吸収線の吸収が最大となり、かつ前記ファブリペロー・エタロンの透過率が最大となるようにすることを特徴とする請求項 8 又は 9 に記載の光源装置。

【請求項 1 1】 前記レーザ光源からのレーザ光を増幅するファイバ増幅器を更に備えることを特徴とする請求項 8 ～ 1 0 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 1 2】 前記増幅されたレーザ光の波長を変換する非線形光学結晶を含む波長変換器を更に備えることを特徴とする請求項 1 1 に記載の光源装置。

【請求項 1 3】 前記設定波長キャリブレーションの終了後に、前記設定波長キャリブレーションが終了した前記ビームモニタ機構のモニタ結果に基づいて、前記レーザ光源からの前記レーザ光の波長をフィードバック制御する第 2 の制御装置を更に備えることを特徴とする請求項 7 ～ 1 2 のいずれか一項に記載の光源装置。

【請求項 1 4】 レーザ光により基板を露光して所定のパターンを基板上に形成する露光方法であって、

露光開始に先立って、前記レーザ光の波長を検出する波長検出装置の検出基準波長の温度依存性を予め測定する第 1 副工程と、前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源から提供される絶対波長に対して前記波長検出装置の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行う第 2 副工程と、前記第 1 副工程で求めた前記温度依存性に基づいて、前記波長検出装置の前記検出基準波長を前記設定波長に設定する第 3 副工程との処理を順次行う第 1 工程と；

しかる後、前記第 3 副工程で前記検出基準波長が前記設定波長に設定された前記波長検出装置の検出結果に基づいて前記レーザ光源からの前記レーザ光の波長を制御しつつ、基板を前記レーザ光で繰り返し露光する第 2 工程とを含む露光方

法。

【請求項 1 5】 前記レーザ光の経路に配置された光学系が更に設けられ、前記光学系の光学性能の変動をキャンセルするために前記設定波長を変更する第 3 工程を更に含むことを特徴とする請求項 1 4 に記載の露光方法。

【請求項 1 6】 レーザ光によりマスクを照明し、該マスクのパターンを基板上に転写する露光装置であって、

前記レーザ光を発振するレーザ光源と、前記レーザ光の中心波長を所定の設定波長に維持するための波長安定化に関連する前記レーザ光の光学特性をモニタするビームモニタ機構と、前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源とを有する光源装置と；

前記レーザ光源から発振される前記レーザ光の中心波長及び前記ビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性の測定データから成る温度依存性マップが記憶された記憶装置と；

前記絶対波長提供源から提供される絶対波長に対して前記ビームモニタ機構の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行うとともに、前記温度依存性マップに基づいて前記検出基準波長を前記設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションを行う第 1 の制御装置と；

前記光源装置から射出されるレーザ光の波長を前記設定波長キャリブレーションが終了した前記ビームモニタ機構のモニタ結果に基づいてフィードバック制御しつつ、前記レーザ光を前記マスクに照射して該マスクを介して前記基板を露光する第 2 の制御装置とを備えることを特徴とする露光装置。

【請求項 1 7】 前記マスクから出射された前記レーザ光を前記基板に投射する投影光学系と；

前記投影光学系の近傍の環境に関連する物理量を測定する環境センサとを更に備え、

前記第 2 の制御装置により前記基板の露光が開始されてから所定のタイミング毎に、前記環境センサの計測値に基づいて標準状態からの前記物理量の変化に起因する前記投影光学系の結像特性の変動分をほぼ相殺するための波長変更量を計算で求め、該波長変更量に応じて前記設定波長を変更する第 3 の制御装置とを更

に備えることを特徴とする請求項 16 に記載の露光装置。

【請求項 18】 前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正装置を更に備え、

前記結像特性補正装置は、前記第 3 の制御装置による前記設定波長の変更の度毎に、前記設定波長の変更により補正される前記投影光学系の結像特性の変動分を除く、結像特性変動を補正することを特徴とする請求項 17 に記載の露光装置

---

。 【請求項 19】 前記結像特性補正装置は、前記第 3 の制御装置による前記設定波長の変更間では、前記物理量の変動を考慮して前記結像特性変動を補正することを特徴とする請求項 18 に記載の露光装置。

【請求項 20】 前記環境センサは、少なくとも大気圧を検出することを特徴とする請求項 17～19 のいずれか一項に記載の露光装置。

【請求項 21】 前記光源装置は、前記レーザ光源からのレーザ光を増幅するファイバ増幅器を更に備えることを特徴とする請求項 16～20 のいずれか一項に記載の露光装置。

【請求項 22】 前記光源装置は、前記増幅されたレーザ光の波長を変換する非線形光学結晶を含む波長変換器を更に備えることを特徴とする請求項 21 に記載の露光装置。

【請求項 23】 前記光源装置を構成する前記ビームモニタ機構は、前記波長変換の途中の中間高調波及び波長変換後の最終高調波のいずれかの光学特性をモニタすることを特徴とする請求項 22 に記載の露光装置。

【請求項 24】 前記レーザ光源は、可視域から赤外域までの間で単一波長のレーザ光を発振する固体レーザであり、前記波長変換器は前記レーザ光を紫外域の波長のレーザ光に変換することを特徴とする請求項 22 に記載の露光装置。

【請求項 25】 リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記リソグラフィ工程で請求項 14 又は 15 に記載の露光方法を用いることを特徴とするデバイス製造方法。

【請求項 26】 リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記リソグラフィ工程で請求項 16～24 のいずれか一項に記載の露光装置を

用いて露光を行うことを特徴とするデバイス製造方法。

【請求項 27】 請求項 25 又は 26 に記載のデバイス製造方法によって製造されたことを特徴とするデバイス。

【請求項 28】 エネルギービームにより感光剤が塗布された基板を露光する露光装置であって、

前記エネルギービームを発生するビーム源と；

前記ビーム源から出力される前記エネルギービームの波長を変更する波長変更装置と；

前記波長変更装置により前記波長が変更されたとき、その波長変更に伴って生じる前記感光剤の感度特性の変化量に応じて前記基板に与えられる積算露光量を制御する露光量制御装置とを備える露光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、波長安定化制御方法及び光源装置、露光方法及び露光装置、並びにデバイス製造方法及びデバイスに係り、更に詳しくは、レーザ光の中心波長を所定の設定波長に維持するための波長安定化制御方法及び該方法が適用される光源装置、前記方法により波長が安定化されたレーザ光を用いて露光を行う露光方法及び露光装置、並びに前記露光装置及び露光方法を用いてデバイスを製造する方法及び該デバイス製造方法によって製造されるデバイスに関する。

【0002】

【従来の技術】

従来より、半導体素子（集積回路）、液晶表示素子等を製造するためのリソグラフィ工程では、種々の露光装置が用いられている。近年では、この種の露光装置としては、フォトマスク又はレチクル上に形成された微細回路パターンを、表面にフォトリソグが塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板上に投影光学系を介して縮小投影し、転写する、いわゆるステッパあるいはいわゆるスキヤニング・ステッパ等の縮小投影露光装置が、高いスループットを有する点から主流となっている。

## 【0003】

しかるに、投影露光装置等の露光装置では、高スループットとともに高い解像力（解像度）が要請される。投影露光装置の解像力 $R$ 、焦点深度 $DOF$ は、露光用照明光の波長 $\lambda$ 、投影光学系の開口数 $N.A.$ を用いて、次式（１）、（２）によってそれぞれ表される。

## 【0004】

$$R = K \cdot \lambda / N.A. \quad \dots\dots (1)$$

## 【0005】

$$DF = \lambda / 2 (N.A.)^2 \quad \dots\dots (2)$$

## 【0006】

上記の式（１）から明らかなように、解像力 $R$ 、すなわち解像できる最小パターン線幅をより小さくするために、①比例定数 $K$ を小さくする、② $N.A.$ を大きくする、③露光用照明光の波長 $\lambda$ を小さくする、の３つの方法が考えられる。ここで、比例定数 $K$ は投影光学系やプロセスによって決まる定数であり、通常 $0.5 \sim 0.8$ 程度の値をとる。この定数 $K$ を小さくする方法は、広い意味での超解像と呼ばれている。今までに、投影光学系の改良、変形照明、位相シフトレチクルなどが提案、研究されてきた。しかし、適用できるパターンに制限があるなどの難点があった。

## 【0007】

一方、開口数 $N.A.$ は式（１）からその値が大きいほど解像力 $R$ を小さくできるが、このことは同時に式（２）から明らかなように焦点深度 $DOF$ が浅くなってしまふことを意味する。このため、 $N.A.$ 値は大きくするにも限界があり、通常は $0.5 \sim 0.6$ 程度が適当とされている。

## 【0008】

従って、解像力 $R$ を小さくする最も単純かつ有効な方法は、露光用照明光の波長 $\lambda$ を小さくすることである。

## 【0009】

かかる理由により、ステッパ等としては紫外域の輝線（ $g$ 線、 $i$ 線等）を出力する超高圧水銀ランプを露光用光源とする $g$ 線ステッパ、 $i$ 線ステッパが従来主

として用いられていたが、近年ではより短波長のKrFエキシマレーザ光（波長248nm）を出力するKrFエキシマレーザを光源とするKrFエキシマレーザ・ステッパが主流となりつつある。現在ではさらに短波長の光源としてArFエキシマレーザ（波長193nm）を使用する露光装置の開発が進められている。

#### 【0010】

周知の如く、このような短波長域のエキシマレーザ光を使用した場合、主として材料の透過率の問題から、投影光学系のレンズに利用できる素材は現時点では合成石英、ホタル石、あるいはフッ化リチウム等のフッ化物結晶等の材料に限られている。

#### 【0011】

しかし、投影光学系にこのような石英やホタル石等のレンズを使用した場合には、実質的に色収差の補正が難しいので、色収差の発生による結像性能の劣化を防ぐために、エキシマレーザ光の発振スペクトル幅を狭める、いわゆる波長の狭帯域化が必要となる。この波長の狭帯域化は、例えばレーザ共振器に設けられた狭帯域化モジュール（例えばプリズムとグレーティング（回折格子）とを組み合わせたものや、エタロン等の光学素子が用いられる）を使用して行われ、露光中投影光学系に供給されるエキシマレーザ光の波長のスペクトル幅を常に所定の波長幅に収めると同時に、その中心波長を所定の波長に維持するための、いわゆる波長安定化の制御が必要となる。

#### 【0012】

上記の波長安定化の制御を実現するためには、エキシマレーザ光の光学特性（中心波長及びスペクトル半値幅等）をモニタする必要がある。エキシマレーザ装置の波長モニタ部は、一般にファブリペロー分光器であるファブリペロー・エタロン（Fabry-Perot etalon：以下、「エタロン素子」ともいう）を中心として構成されている。

#### 【0013】

##### 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上述したエキシマレーザ装置は大型であること、1パルスあた

りのエネルギーが大きいことにより光学部品の損傷が生じやすいこと、有毒なフッ素ガスを使用するためレーザのメンテナンスが煩雑でかつ費用が高額となるなどの、露光装置の光源として不利な点が存在する。

## 【0014】

また、半導体素子の高集積化に伴いパターン線幅がますます微細化し、ステップ等の露光装置には、露光精度、例えばマスクと基板との重ね合せ精度のますますの向上が求められるようになってきた。この重ね合せ精度は投影光学系のディストーション成分等の収差を如何に抑えるかに左右される。このため、露光装置には、露光用照明光の中心波長の安定性及びますますの狭帯域化が求められるようになってきた。この内、狭帯域化に対処する手法としては、レーザ光源そのものとして、単一波長光源を採用することが考えられる。

## 【0015】

一方、投影光学系は所定の露光波長にのみ合わせて調整されているため、中心波長を安定に維持できなければ、結果的に投影光学系の色収差が発生したり、投影光学系の倍率、ディストーション及びフォーカス等の結像特性が変動してしまうため、中心波長の安定性を維持することは必要不可欠である。

## 【0016】

しかしながら、エタロン素子はエタロン雰囲気温度や圧力の影響を受けるため、エタロン雰囲気温度変動や大気圧変動の影響が無視出来なくなる。

## 【0017】

また、デバイスルール（実用最小線幅）は、将来的にますます微細化することは確実であり、次世代の露光装置ではますます高い重ね合わせ精度が要求される。この重ね合わせ精度は、例えばディストーション成分を如何に抑えるかに左右される。また、焦点深度の増大の為には、UDOF（ユーザブルDOF）の増化及びフォーカスの安定性が必要になる。いずれも、高度な中心波長の安定性及びスペクトル半値幅の制御性が要求される。

## 【0018】

本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、レーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持することができる波長安定化制御方法及

び光源装置を提供することにある。

【0019】

また、本発明の第2の目的は、雰囲気温度変動等に影響されず、高精度な露光を行うことができる露光方法及び露光装置を提供することにある。

【0020】

本発明の第3の目的は、高集積度のマイクロデバイスの生産性を向上すること  
ができるデバイス製造方法を提供することにある。

【0021】

本発明の第4の目的は、感光剤の感度特性の変化によらず精度良く露光を行う  
ことができる露光装置を提供することにある。

【0022】

【課題を解決するための手段】

請求項1に記載の発明は、レーザ光源(160A)から発振されるレーザ光の中心波長を所定の設定波長に維持するための波長安定化制御方法であって、前記レーザ光の波長を検出する波長検出装置(164)の検出基準波長の温度依存性を予め測定する第1工程と；前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源(165)から提供される絶対波長に対して前記波長検出装置の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行う第2工程と；前記第1工程で求めた前記温度依存性に基づいて、前記波長検出装置の前記検出基準波長を前記設定波長に設定する第3工程とを含む。

【0023】

ここで、「設定波長に近い絶対波長」は、設定波長と同一の波長も含む概念である。

【0024】

これによれば、第1工程でレーザ光の波長を検出する波長検出装置の検出基準波長の温度依存性を予め測定しておく。次いで、第2工程で設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源から提供される絶対波長に対して波長検出装置の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行う。そして、第3工程で第1工程で求めた温度依存性に基づいて、波長検出装置の検出基準波長



を設定波長に設定する。このように、本発明によれば、予め測定した波長検出装置の検出基準波長の温度依存性を用いて、絶対波長キャリブレーション後の波長検出装置の検出基準波長を設定波長に設定するので、常に確実に波長検出装置の検出基準波長を設定波長に正確に設定することができ、これにより波長検出装置の雰囲気温度等が変動しても、それに影響を受けることなく、波長検出装置を用いてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御が可能になる。

## 【0025】

この場合において、請求項2に記載の発明の如く、前記波長検出装置が、ファブリペロー・エタロンである場合には、前記第1工程で前記波長検出装置の共鳴波長の温度依存性を測定し、前記第2工程で前記波長検出装置の温度を制御することにより前記共鳴波長を前記絶対波長にほぼ一致させ、前記第3工程で前記波長検出装置の温度を制御することにより前記共鳴波長を前記設定波長に設定することとしても良い。かかる場合には、ファブリペロー・エタロンの波長検出の基準となる共鳴波長の温度依存性を利用して、その共鳴波長（検出基準波長）を設定波長に設定することが可能となる。

## 【0026】

この場合において、請求項3に記載の発明の如く、前記絶対波長提供源が、前記レーザ光が入射する吸収セルである場合には、前記第2工程では、前記吸収セルの前記設定波長に最も近い吸収線の吸収が最大となり、かつ前記波長検出装置の透過率が最大となるようにすることとしても良い。

## 【0027】

ここで、「設定波長に最も近い吸収線」には、「設定波長と同一波長の吸収線」も含まれる。

## 【0028】

上記請求項1～3に記載の各発明において、請求項4に記載の発明の如く、前記第1工程では前記レーザ光の中心波長の温度依存性をも予め計測し、前記第2工程では、前記レーザ光の波長制御をも併せて行うこととしても良い。かかる場合には、前述した絶対波長キャリブレーションを、レーザ光の波長制御を行わな

い場合に比べて短時間で完了することができる。

【0029】

上記請求項1～4に記載の各発明において、請求項5に記載の発明の如く、前記第3工程で前記検出基準波長が前記設定波長に設定された前記波長検出装置の検出結果に基づいて前記レーザ光源からの前記レーザ光の波長を制御する第4工程を更に含んでいても良い。かかる場合には、その検出基準波長が設定波長に正確に設定された波長検出装置の検出結果に基づいてレーザ光源からのレーザ光の波長を制御するので、そのレーザ光の波長を設定波長に安定的に維持することができる。

【0030】

上記請求項4及び5に記載の各発明において、請求項6に記載の発明の如く、前記レーザ光の波長制御は、前記レーザ光源の温度、供給電流の少なくとも一方を制御することにより行うこととしても良い。例えば、DFB半導体レーザやファイバーレーザのような単一波長発振レーザの場合、温度制御によってレーザの発振波長を制御することもできるし、DFB半導体レーザの場合、供給電流（ドライブ電流）の制御によってもレーザの発振波長を制御することもできる。

【0031】

請求項7に記載の発明に係る光源装置は、レーザ光を発振するレーザ光源（160A）と；前記レーザ光の中心波長を所定の設定波長に維持するための波長安定化に関連する前記レーザ光の光学特性をモニタするビームモニタ機構（164）と；前記ビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性のデータを含む温度依存性マップが記憶された記憶装置（51）と；前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源と；前記絶対波長提供源（165）から提供される絶対波長に対して前記ビームモニタ機構の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行うとともに、前記温度依存性マップに基づいて前記検出基準波長を前記設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションを行う第1の制御装置（50）とを備える。

【0032】

ここで、「設定波長に近い絶対波長」は、設定波長と同一の波長も含む概念で

ある。

【 0 0 3 3 】

これによれば、記憶装置に、ビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性のデータを含む温度依存性マップが記憶されている。そして、第 1 の制御装置では、絶対波長提供源から提供される絶対波長に対してビームモニタ機構の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行うとともに、前記温度依存性マップに基づいて前記検出基準波長を前記設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションを行う。このように、本発明によれば、既知のビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性のデータを含む温度依存性マップを用いて、絶対波長キャリブレーション後のビームモニタ機構の検出基準波長を設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションが行われる。このため、常に確実にビームモニタ機構の検出基準波長を設定波長に正確に設定することができ、これによりビームモニタ機構の雰囲気温度等が変動しても、それに影響を受けることなく、ビームモニタ機構を用いてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御が可能になる。

【 0 0 3 4 】

この場合において、請求項 8 に記載の発明の如く、前記ビームモニタ機構が、ファブリペロー・エタロンを含み、前記温度依存性マップが、前記ファブリペロー・エタロンの共鳴波長の温度依存性の測定結果に基づくデータを含む場合には、前記第 1 の制御装置は、前記ビームモニタ機構を構成する前記ファブリペロー・エタロンの温度を制御することにより、前記検出基準波長の前記絶対波長キャリブレーション及び前記設定波長キャリブレーションを行うこととしても良い。かかる場合には、ファブリペロー・エタロンの波長検出の基準となる共鳴波長の温度依存性を利用して、その検出基準波長を設定波長に設定することが可能となる。

【 0 0 3 5 】

この場合において、請求項 9 に記載の発明の如く、前記温度依存性マップは、前記レーザ光源から発振される前記レーザ光の中心波長の温度依存性のデータを更に含む場合には、前記第 1 の制御装置は、前記絶対波長キャリブレーションを

行う際に、前記レーザ光源の波長制御をも併せて行うこととしても良い。かかる場合には、前述した絶対波長キャリブレーションを、レーザ光の波長制御を行わない場合に比べて短時間で完了することができる。

## 【0036】

請求項 8 及び 9 に記載の各発明において、請求項 10 に記載の発明の如く、前記絶対波長提供源は、前記レーザ光が入射する吸収セル (165) であり、前記第 1 の制御装置は、前記絶対波長キャリブレーションを行う際に、前記吸収セルの前記設定波長に最も近い吸収線の吸収が最大となり、かつ前記ファブリペロー・エタロンの透過率が最大となるようにすることとしても良い。

## 【0037】

ここで、「設定波長に最も近い吸収線」には、「設定波長と同一波長の吸収線」も含まれる。

## 【0038】

上記請求項 8～10 に記載の各発明において、請求項 11 に記載の発明の如く、前記レーザ光源からのレーザ光を増幅するファイバ増幅器 (168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>) を更に備えていても良い。かかる場合には、ファイバ増幅器によりレーザ光源からのレーザ光を増幅することができるので、要求される光量が大きい場合であっても、小型のレーザ光源、例えば、DFB 半導体レーザ、ファイバーレーザ等の固体レーザを用いることが可能となり、装置の小型・軽量化が可能となる。

## 【0039】

この場合において、請求項 12 に記載の発明の如く、前記増幅されたレーザ光の波長を変換する非線形光学結晶を含む波長変換器 (163) を更に備えていても良い。かかる場合には、波長変換器により増幅されたレーザ光の波長変換が可能となるので、例えば、波長変換器によりレーザ光の波長変換を行って高調波を発生させることにより、短波長の高いエネルギービームを出力する小型の光源装置を得ることが可能になる。

## 【0040】

上記請求項 7～12 に記載の各発明に係る光源装置において、請求項 13 に記載の発明の如く、前記設定波長キャリブレーションの終了後に、前記設定波長キ

ャリブレーションが終了した前記ビームモニタ機構のモニタ結果に基づいて、前記レーザ光源からの前記レーザ光の波長をフィードバック制御する第2の制御装置(50)を更に備えることとしても良い。かかる場合には、第2の制御装置により、その検出基準波長が設定波長に正確に設定されたビームモニタ機構のモニタ結果に基づいて、レーザ光源からのレーザ光の波長が制御されるので、そのレーザ光の波長を設定波長に安定的に維持することができる。

---

## 【0041】

請求項14に記載の発明は、レーザ光により基板を露光して所定のパターンを基板上に形成する露光方法であって、露光開始に先立って、前記レーザ光の波長を検出する波長検出装置(164)の検出基準波長の温度依存性を予め測定する第1副工程と、前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源(165)から提供される絶対波長に対して前記波長検出装置の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行う第2副工程と、前記第1副工程で求めた前記温度依存性に基づいて、前記波長検出装置の前記検出基準波長を前記設定波長に設定する第3副工程との処理を順次行う第1工程と；しかる後、前記第3副工程で前記検出基準波長が前記設定波長に設定された前記波長検出装置の検出結果に基づいて前記レーザ光源からの前記レーザ光の波長を制御しつつ、基板を前記レーザ光で繰り返し露光する第2工程とを含む。

## 【0042】

これによれば、第1工程の処理により、予め測定した波長検出装置の検出基準波長の温度依存性を用いて、絶対波長キャリブレーション後の波長検出装置の検出基準波長を設定波長に設定するので、常に確実に波長検出装置の検出基準波長が設定波長に正確に設定される。そして、第2工程で、検出基準波長が設定波長に設定された波長検出装置の検出結果に基づいてレーザ光源からのレーザ光の波長を制御しつつ、基板がレーザ光で繰り返し露光される。従って、本発明によれば、波長検出装置の雰囲気温度等が変動しても、それに影響を受けることなく、波長検出装置の検出基準波長を設定波長に正確に設定し、その波長検出装置を用いてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御を行いつつ、基板がレーザ光で繰り返し露光されるので、雰囲気温度変動

等の影響の少ない高精度な露光が可能になる。

【0043】

この場合において、請求項15に記載の発明の如く、前記レーザ光の経路に配置された光学系（12、PL）が更に設けられている場合には、前記光学系の光学性能の変動をキャンセルするために前記設定波長を変更する第3工程を更に含んでいても良い。例えば大気圧の変動等があると光学系の光学性能（諸収差等）

が変動することがあるが、このような場合に、第3工程において光学系の光学性能の変動をキャンセルするために設定波長が変更される結果、その変更後の設定波長を基準として波長検出装置を用いてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御を行いつつ、基板をレーザ光で繰り返し露光することができる。このため、結果的に大気圧の変動が存在しなかったかのような状態（すなわち、光学性能の変動量が相殺された状態）で、精度良く露光が行われることとなる。

【0044】

請求項16に記載の発明は、レーザ光によりマスク（R）を照明し、該マスクのパターンを基板（W）上に転写する露光装置であって、前記レーザ光を発振するレーザ光源（160A）と、前記レーザ光の中心波長を所定の設定波長に維持するための波長安定化に関連する前記レーザ光の光学特性をモニタするビームモニタ機構（164）と、前記設定波長に近い絶対波長を提供する絶対波長提供源（165）とを有する光源装置（16）と；前記レーザ光源から発振される前記レーザ光の中心波長及び前記ビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性の測定データから成る温度依存性マップが記憶された記憶装置（51）と；前記絶対波長提供源から提供される絶対波長に対して前記ビームモニタ機構の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行うとともに、前記温度依存性マップに基づいて前記検出基準波長を前記設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションを行う第1の制御装置（50）と；前記光源装置から射出されるレーザ光の波長を前記設定波長キャリブレーションが終了した前記ビームモニタ機構のモニタ結果に基づいてフィードバック制御しつつ、前記レーザ光を前記マスクに照射して該マスクを介して前記基板を露光する第2の制御装置（50）と

を備える。

【 0 0 4 5 】

これによれば、第 1 の制御装置により絶対波長提供源から提供される絶対波長に対してビームモニタ機構の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーション、及び記憶装置に記憶された温度依存性マップ（レーザ光源から発振されるレーザ光の中心波長及びビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性の測定データから成る）に基づいて検出基準波長を設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションが行われる。このようにして、既知のビームモニタ機構の検出基準波長の温度依存性を用いて、絶対波長キャリブレーション後のビームモニタ機構の検出基準波長を設定波長に一致させることができる。そして、第 2 の制御装置では、光源装置から射出されるレーザ光の波長を設定波長キャリブレーションが終了したビームモニタ機構のモニタ結果に基づいてフィードバック制御しつつ、レーザ光をマスクに照射して該マスクを介して基板を露光する。従って、ビームモニタ機構のモニタ結果に基づいてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御を行いつつ、レーザ光をマスクに照射して該マスクを介して基板を露光することができるので、雰囲気温度変動等の影響の少ない高精度な露光が可能になる。

【 0 0 4 6 】

この場合において、請求項 1 7 に記載の発明の如く、前記マスクから出射された前記レーザ光を前記基板に投射する投影光学系（P L）と；前記投影光学系の近傍の環境に関連する物理量を測定する環境センサ（7 7）とを更に備える場合、前記第 2 の制御装置により前記基板の露光が開始されてから所定のタイミング毎に、前記環境センサの計測値に基づいて標準状態からの前記物理量の変化に起因する前記投影光学系の結像特性の変動分をほぼ相殺するための波長変更量を計算で求め、該波長変更量に応じて前記設定波長を変更する第 3 の制御装置（5 0）とを更に備えることとすることができる。投影光学系の設置環境に関連する物理量（周囲気体の圧力、温度、湿度など）が標準状態から変動すると、大気の屈折率変動し、これにより投影光学系が本来それに合わせて調整されていた露光波長（設定波長）が変動し、露光光であるレーザ光の波長がもとのまま投影光学

系に照射されると、投影光学系の結像特性に前記物理量の変動に起因する諸収差（色収差を含む）が発生する。本発明によれば、かかる場合に、第3の制御装置が、基板の露光が開始されてから所定のタイミング毎に、環境センサの計測値に基づいて標準状態からの前記物理量の変化に起因する投影光学系の結像特性の変動分をほぼ相殺するための波長変更量を計算で求め、該波長変更量に応じて設定波長を変更する。この結果、投影光学系の諸収差が同時に補正され、第2の制御装置がその変更後の設定波長を基準としてビームモニタ機構を用いてレーザー光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御を行いつつ、レーザー光をマスクに照射する。これにより、マスクから出射したレーザー光が投影光学系により基板上に投射され基板が露光される。この場合、結果的に環境条件に関連する物理量の変動が存在しなかったかのような状態（すなわち、結像特性の変動量が相殺された状態）で、精度良く露光が行われることとなる。

## 【0047】

例えば、物理量が大気圧を含む場合、標準状態における大気圧（標準大気圧）は任意で良いが、例えば投影光学系などの光学性能（投影光学系の結像特性を含む）が最良となるようにその調整を行うときの基準となる大気圧であることが望ましく、この場合には、標準大気圧では投影光学系などの光学性能の変動量が零となる。通常、標準大気圧は、露光装置が設置される納入先（工場など）の平均大気圧に設定されることが多い。従って、露光装置を製造する組立地と、露光装置が設置される納入先（移設地）とに標高差があるときは、例えば標準大気圧（平均大気圧など）下に投影光学系などが設置されているかのように、組立地ではその標高差に対応する波長だけ露光波長をシフトさせた上で投影光学系などの調整を行い、移設地ではその波長を露光波長に戻す、あるいは組立地では露光波長のもとで投影光学系などの調整を行い、移設地でその標高差を相殺するように露光波長をシフトさせる。

## 【0048】

なお、投影光学系が空気以外の気体中に設置される場合、上記の「大気圧」はその投影光学系の周囲の気体の圧力となる。

## 【0049】



ここで、本発明では、例えば投影光学系によって照明光の波長を変更することと、その投影光学系の設置環境（周囲の気体の圧力、温度、湿度など）を変更することは実質的に等価であることを利用している。このとき、投影光学系の屈折素子の硝材の種類が単一であるときには、その等価性が完全に成立し、硝材が複数種類であってもその等価性はほぼ成立する。従って、設置環境に対する投影光学系（特に屈折素子）の屈折率の変化特性を用いて、照明光の波長のみを変化させることによって、実質的に投影光学系の設置環境が変化した場合と等価な状態を実現することができる。

## 【 0 0 5 0 】

ここで、前記所定のタイミングは、所定枚数の基板の露光終了毎のタイミングであっても良く、基板上の 1 ショットの露光終了の度毎のタイミングであっても良くあるいは露光条件の変更の度毎のタイミングであっても良い。ここで、所定枚数は 1 枚であっても良く、1 ロットに相当する枚数であっても良い。また、露光条件の変更とは、照明条件の変更の他、マスクの交換等の広い意味での露光に関する条件が変更された場合の全てを含む。

## 【 0 0 5 1 】

あるいは、所定のタイミングは、前記環境センサの計測値に基づいて得られる環境に関連する物理量（又はその変化量）が所定量以上変化したタイミングであっても良く、あるいは投影光学系などの光学性能（又はその変動量）を演算する間隔（例えば数  $\mu s$ ）に合わせて、ほぼリアルタイムで行っても良い。あるいは所定のタイミングは、予め定めた所定の時間毎のタイミングであっても良い。

## 【 0 0 5 2 】

この場合において、請求項 1 8 に記載の発明の如く、前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正装置（5 0、7 4 a、7 4 b、7 4 c、7 8）を更に備え、前記結像特性補正装置は、前記第 3 の制御装置による前記設定波長の変更の度毎に、前記設定波長の変更により補正される前記投影光学系の結像特性の変動分を除く、結像特性変動を補正することとしても良い。

## 【 0 0 5 3 】

ここで、「設定波長の変更により補正される前記投影光学系の結像特性の変動

分を除く、結像特性変動」には、設定波長の変更により前記物理量の変動に起因する投影光学系の結像特性の変動が完全に補正されなかった場合には、その補正されなかった、前記物理量の変動に起因する投影光学系の結像特性の変動分も含まれる。

## 【0054】

かかる場合には、前記物理量の変動に起因する投影光学系の結像特性の変動分（以下、適宜「環境変動分」と呼ぶ）の大部分が上記の設定波長の変更により補正され、その残りの環境変動分が他の照射変動分等とともに、結像特性補正装置により補正される。この結果、投影光学系の結像特性をほぼ完全に補正した状態で高精度な露光が行われる。

## 【0055】

この場合において、請求項19に記載の発明の如く、前記結像特性補正装置は、前記第3の制御装置による前記設定波長の変更間では、前記レーザ光の波長変動を考慮して前記結像特性変動を補正することとしても良い。設定波長の変更は上述した所定のタイミングで行われるが、この設定波長の変更間隔が長いと、その間で前記物理量の変動が生じるので、これに起因する環境変動分を結像特性補正装置が補正することとしたものである。

## 【0056】

上記請求項17～19に記載の露光装置において、請求項20に記載の発明の如く、前記環境センサは、少なくとも大気圧を検出することとしても良い。

## 【0057】

上記請求項16～20に記載の各発明に係る露光装置において、請求項21に記載の発明の如く、前記光源装置（16）は、前記レーザ光源からのレーザ光を増幅するファイバ増幅器（168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>）を更に備えることとしても良い。かかる場合には、ファイバ増幅器によりレーザ光源からのレーザ光を増幅することができるので、要求される光量が多い場合であっても、小型のレーザ光源、例えば、DFB半導体レーザ、ファイバーレーザ等の固体レーザを用いることが可能となり、光源装置の小型・軽量化、ひいては露光装置のフットプリントの狭小化が可能となる。

## 【 0 0 5 8 】

この場合において、請求項 2 2 に記載の発明の如く、前記光源装置は、前記増幅されたレーザ光の波長を変換する非線形光学結晶を含む波長変換器（1 6 3）を更に備えていても良い。かかる場合には、波長変換器により増幅されたレーザ光の波長変換が可能となるので、例えば、波長変換器によりレーザ光の波長変換を行って高調波を発生させることにより、~~短波長の高エネルギーのエネルギービーム~~を出力が可能となるので、露光の解像力が向上し、微細パターンを高精度に基板上に転写することが可能になる。

## 【 0 0 5 9 】

この場合において、請求項 2 3 に記載の発明の如く、前記光源装置を構成する前記ビームモニタ機構は、前記波長変換の途中の中間高調波及び波長変換後の最終高調波のいずれか、あるいは両方の光学特性をモニタすることとしても良い。

## 【 0 0 6 0 】

上記請求項 2 2 に記載の発明に係る露光装置において、請求項 2 4 に記載の発明の如く、前記レーザ光源は、可視域から赤外域までの間で単一波長のレーザ光を発振する固体レーザであり、前記波長変換器は前記レーザ光を紫外域の波長のレーザ光に変換することとしても良い。かかる場合には、波長の短い紫外光を用いて解像力のより露光を行うことができる。

## 【 0 0 6 1 】

請求項 2 4 に記載の発明は、リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記リソグラフィ工程で請求項 1 4 又は 1 5 に記載の露光方法を用いることを特徴とする。また、請求項 2 5 に記載の発明は、リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、前記リソグラフィ工程で、請求項 1 6 ～ 2 3 のいずれか一項に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とする。

## 【 0 0 6 2 】

これらのデバイス製造方法によれば、上記請求項 1 4 及び 1 5 に記載の各露光方法、請求項 1 6 ～ 2 3 に記載の各露光装置により精度良くパターンを基板上に形成することが可能になる結果、高集積度のマイクロデバイスの生産性を向上することができる。

## 【0063】

請求項28に記載の発明は、エネルギービームにより感光剤が塗布された基板（W）を露光する露光装置であって、前記エネルギービームを発生するビーム源（16A）と；前記ビーム源から出力される前記エネルギービームの波長を変更する波長変更装置（16B、50）と；前記波長変更装置により前記波長が変更されたとき、その波長変更に伴って生じる前記感光剤の感度特性の変化量に応じて前記基板に与えられる積算露光量を制御する露光量制御装置（50）とを備える。

## 【0064】

これによれば、波長変更装置により、ビーム源から出力されるエネルギービームの波長が変更されると、露光量制御装置によりその波長変更に伴って生じる基板上の感光剤の感度特性の変化量に応じて基板に与えられる積算露光量が制御される。

## 【0065】

すなわち、エネルギービームの波長を変更すると、その波長の変更（波長シフト）によって基板上の感光剤（レジスト）の感度特性が変化することがあるが、そのような場合に、本発明では、露光量制御装置により、その波長変更に伴って生じる感光剤の感度特性の変化量に応じて基板に与えられる積算露光量を制御することができる。従って、感光剤の感度特性の変化に影響されることのない精度の良い露光が可能になる。

## 【0066】

## 【発明の実施の形態】

以下、本発明の一実施形態を図1～図6に基づいて説明する。

## 【0067】

図1には、本発明に係る光源装置を含んで構成された一実施形態に係る露光装置10の概略構成が示されている。この露光装置10は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型露光装置である。

## 【0068】

この露光装置10は、光源装置16及び照明光学系12から成る照明系、この照明系からの露光用照明光（以下、「露光光」という）ILにより照明されるマ

スクとしてのレチクルRを保持するレチクルステージRST、レチクルRから射出された露光光ILを基板としてのウエハW上に投射する投影光学系PL、ウエハWを保持する基板ステージとしてのZチルトステージ58が搭載されたXYステージ14、及びこれらの制御系等を備えている。

【0069】

前記光源装置16は、例えば、波長193nm（ArFエキシマレーザ光とほぼ同一波長）の紫外パルス光、あるいは波長157nm（F<sub>2</sub>レーザ光とほぼ同一波長）の紫外パルス光を出力する高調波発生装置である。この光源装置16は、光源としてのレーザ光源を含む光源部16A、レーザ制御装置16B及び光量制御装置16Cとを備えている。この光源装置16は、前記照明光学系12、レチクルステージRST、投影光学系PL、Zチルトステージ58、XYステージ14及びこれら各部が搭載された不図示の本体コラム等から成る露光装置本体とともに、温度、圧力、湿度等が高精度に調整されたエンバイロンメンタル・チャンバ（以下、「チャンバ」という）11内に収納されている。

【0070】

図2には、光源装置16の内部構成が装置全体を統括制御する主制御装置50とともにブロック図にて示されている。

【0071】

この図2に示されるように、光源部16Aは、光発生部としてのパルス光発生部160、光増幅部161、四分の一波長板162、波長変換部163、ビームモニタ機構164及び吸収セル165等を含んで構成されている。

【0072】

前記パルス光発生部160は、レーザ光源160A、光カップラBS1、BS2、光アイソレータ160B及び光変調器としての電気光学変調器（以下、「EOM」という）160C等を有する。なお、レーザ光源160Aと波長変換部163との間の各要素間は光ファイバにより光学的に接続されている。

【0073】

これを更に詳述すると、レーザ光源160Aとしては、ここでは、単一波長発振レーザ、例えば、発振波長1.544μm、連続波出力（以下「CW出力」と

いう) 20mWのInGaAsP, DFB半導体レーザが用いられている。以下においては、レーザ光源160Aを適宜「DFB半導体レーザ160A」とも呼ぶものとする。

【0074】

ここで、DFB半導体レーザとは、縦モード選択性の低いファブリーペロー型共振器の代わりに、回折格子を半導体レーザ内に作り上げたもので、どのような状況下であっても単一縦モード発振をするように構成されており、分布帰還型(Distributed Feedback: DFB)レーザと呼ばれるものである。この様なレーザでは基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は0.01pm以下に抑えられる。

【0075】

また、DFB半導体レーザは、通常、ヒートシンクの上に設けられ、これらが筐体内に収納されている。本実施形態では、DFB半導体レーザ160Aに付設されるヒートシンク上に温度調整器(例えばペルチェ素子など)が設けられており、後述するように、レーザ制御装置16Bがその温度を制御することにより発振波長が制御(調整)可能な構成となっている。

【0076】

本実施形態では、上記の発振波長の制御のため、DFB半導体レーザ160Aの発振波長の温度依存性を予め測定し、その測定結果を温度依存性マップとしてを主制御装置50に併設された記憶装置としてのメモリ51内に、テーブルの形、変換関数、あるいは変換係数として格納(記憶)している。

【0077】

ここでは、DFB半導体レーザ160Aの発振波長は0.1nm/℃程度の温度依存性を持つものとする。従って、例えば、DFB半導体レーザの温度を1℃変化させると、基本波(1544nm)ではその波長が0.1nm変化するので、8倍波(193nm)ではその波長が0.0125nm変化し、10倍波(157nm)ではその波長が0.01nm変化することになる。

【0078】

なお、露光装置では露光用照明光(パルス光)の波長をその中心波長に対して

±20 pm 程度変化させることができれば十分である。従って、DFB 半導体レーザー 11 の温度を 8 倍波では ±1.6℃ 程度、10 倍波では ±2℃ 程度変化させれば良い。

## 【0079】

なお、レーザー光源 160A として、DFB 半導体レーザー等の半導体レーザーに限らず、例えば発振波長が 990 nm 付近のイットリビウム(Yb)・ドープ・ファイバーレーザーなどを用いることもできる。

## 【0080】

前記光カップラ BS1、BS2 としては、透過率が 97% 程度のものが用いられている。このため、DFB 半導体レーザー 160A からのレーザー光は光カップラ BS1 で分波され、その 97% 程度が光カップラ BS2 に入射し、残り 3% 程度がビームモニタ機構 164 に入射する。また、光カップラ BS2 に入射したレーザー光は、該光カップラ BS2 で分波され、その 97% 程度が次段の光アイソレータ 160B に向かって進み、残り 3% 程度が吸収セル 165 に入射するようになっている。

## 【0081】

なお、ビームモニタ機構 164、吸収セル 165 等については、後に更に詳述する。

## 【0082】

前記光アイソレータ 160B は、光カップラ BS2 から EOM160C に向かう方向の光のみを通過させ、反対向きの光の通過を阻止するためのデバイスである。この光アイソレータ 160B により、反射光(戻り光)に起因する DFB 半導体レーザー 160A の発振モードの変化や雑音の発生等が防止される。

## 【0083】

前記 EOM160C は、光アイソレータ 160B を通過したレーザー光(CW 光(連続光))をパルス光に変換するためのものである。EOM160C としては、屈折率の時間変化に伴うチャープによる半導体レーザー出力の波長広がり小さくなるように、チャープ補正を行った電極構造を持つ電気光学変調器(例えば二電極型変調器)が用いられている。EOM160C は、光量制御装置 16C から

印加される電圧パルスに同期して変調されたパルス光を出力する。一例として、EOM160CによりDFB半導体レーザ160Aで発振されたレーザ光がパルス幅1ns、繰り返し周波数100kHz（パルス周期約10μs）のパルス光に変調されるものとする、この光変調の結果、EOM160Cから出力されるパルス光のピーク出力は20mW、平均出力は2μWとなる。なお、ここでは、EOM160Cの挿入による損失がないものとしたが、その挿入損失がある、例えば損失が-3dBである場合、パルス光のピーク出力は10mW、平均出力は1μWとなる。

【0084】

なお、繰り返し周波数を100kHz程度以上に設定した場合には、後述するファイバ増幅器においてASE（Amplified Spontaneous Emission, 自然放出光）ノイズの影響による増幅率低下を阻止することができるので、このようにすることが望ましい。

【0085】

なお、EOM160Cのみを用いてパルス光をオフの状態にしてもその消光比が充分でない場合には、DFB半導体レーザ160Aの電流制御を併用することが望ましい。すなわち、半導体レーザなどではその電流制御を行うことで、出力光をパルス発振させることができるので、DFB半導体レーザ160Aの電流制御とEOM160Cとを併用してパルス光を発生させることが望ましい。一例として、DFB半導体レーザ160Aの電流制御によって、例えば10~20ns程度のパルス幅を有するパルス光を発振させるとともに、EOM160Cによってそのパルス光からその一部のみを切り出し、パルス幅が1nsのパルス光に変調する。このようにすれば、EOM160Cのみを用いる場合に比べて、パルス幅が狭いパルス光を容易に発生させることが可能になるとともに、パルス光の発振間隔や発振の開始及びその停止などをより簡単に制御することが可能になる。

【0086】

なお、EOM160Cに代えて、音響光学光変調素子（AOM）を用いることも可能である。

【0087】



前記光増幅部 161 は、EOM 160C からのパルス光を増幅するもので、ここでは、複数のファイバ増幅器を含んで構成されている。図 3 には、この光増幅部 161 の構成の一例が、EOM 160C とともに示されている。

#### 【0088】

この図 3 に示されるように、光増幅部 161 は、チャンネル 0 からチャンネル 127 の総計 128 チャンネルを有する分岐及び遅延部 167 と、この分岐及び遅延部 167 のチャンネル 0 からチャンネル 127 の総計 128 チャンネルのそれぞれの出力段に接続されたファイバ増幅器  $168_1 \sim 168_{128}$  と、これらのファイバ増幅器  $168_1 \sim 168_{128}$  のそれぞれに狭帯域フィルタ  $169_1 \sim 169_{128}$  及び光アイソレータ  $170_1 \sim 170_{128}$  をそれぞれ介して接続された最終段のファイバ増幅器  $171_1 \sim 171_{128}$  等を備えている。この場合、図 3 から明らかなように、ファイバ増幅器  $168_n$ 、狭帯域化フィルタ  $169_n$ 、光アイソレータ  $170_n$ 、及びファイバ増幅器  $171_n$  ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) によって、それぞれ光経路  $172_n$  ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) が構成されている。

#### 【0089】

光増幅部 161 の上記構成各部について更に詳述すると、前記分岐及び遅延部 167 は、総計 128 チャンネルのチャンネルを有し、各チャンネルの出力に所定の遅延時間（ここでは、3 ns）を与えるためのものである。この分岐及び遅延部 167 は、本実施形態では、EOM 160C から出力されるパルス光を 35 dB（3162 倍）の光増幅を行うエルビウム（Er）・ドープ・ファイバ増幅器（EDFA）と、この EDFA の出力をチャンネル 0～3 の 4 出力に並列分割する光分岐手段であるスプリッタ（平板導波路  $1 \times 4$  スプリッタ）と、このスプリッタのチャンネル 0～3 の各出力端に接続された各々長さの異なる 4 本の光ファイバと、これら 4 本の光ファイバの出力をそれぞれチャンネル 0～31 に 32 分割する 4 つのスプリッタ（平板導波路  $1 \times 32$  スプリッタ）と、各スプリッタのチャンネル 0 を除くチャンネル 1～31 にそれぞれ接続された長さの異なる各 31 本（総計 124 本）の光ファイバとを含んで構成されている。以下、上記各スプリッタ（平板導波路  $1 \times 32$  スプリッタ）の 0～31 チャンネルを総称してブロックと呼ぶ。

#### 【0090】

これを更に詳述すると、上記初段のEDFAから出力されるパルス光は、ピーク出力約63W、平均出力約6.3mWとなる。このパルス光がスプリッタ（平板導波路1×4スプリッタ）によりチャンネル0～3の4出力に並列分割され、各チャンネルの出力光には、上記4本の光ファイバ長に対応した遅延が与えられる。例えば本実施形態では、光ファイバ中の光の伝搬速度を $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ であるとし、スプリッタ（平板導波路1×4スプリッタ）のチャンネル0、1、2、3にそれぞれ0.1m、19.3m、38.5m、57.7mの長さの光ファイバ（以下、「第1の遅延ファイバ」と呼ぶ）が接続されている。この場合、各第1の遅延ファイバ出口での隣り合うチャンネル間の光の遅延は96nsとなる。

#### 【0091】

また、上記4つのスプリッタ（平板導波路1×32スプリッタ）のチャンネル1～31には、それぞれ $0.6 \times N$ メートル（Nはチャンネル番号）の長さの光ファイバ（以下、「第2の遅延ファイバ」と呼ぶ）が接続されている。この結果、各ブロック内の隣り合うチャンネル間では3nsの遅延が与えられ、各ブロックのチャンネル0出力に対し、チャンネル31出力は、 $3 \times 31 = 93 \text{ ns}$ の遅延が与えられる。

#### 【0092】

一方、第1から第4までの各ブロック間には、前記のように第1の遅延ファイバによって、各ブロックの入力時点で各々96nsの遅延が与えられている。従って、第2ブロックのチャンネル0出力は第1ブロックのチャンネル0出力に対し96nsの遅延となり、第1ブロックのチャンネル31との遅延は3nsとなる。このことは、第2～第3、第3～第4のブロック間においても同様である。この結果、全体の出力として総計128チャンネルの出力端で、隣り合うチャンネル間に3nsの遅延を持つパルス光が得られる。

#### 【0093】

以上の分岐及び遅延により、総計128チャンネルの出力端では、隣り合うチャンネル間で3nsの遅延を持つパルス光が得られるが、このとき各々の出力端で観測される光パルスは、EOM160Cによって変調されたパルスと同じ100kHz（パルス周期10μs）である。従って、レーザ光発生部全体として見ると

、128パルスが3 ns 間隔で発生した後、9.62  $\mu$ s の間隔を置いて次のパルス列が発生するという繰り返しが100 kHz で行われる。即ち全体の出力は  $128 \times 100 \times 10^3 = 1.28 \times 10^7$  パルス/秒となる。

【0094】

なお本実施形態では、分割数を128とし、また遅延用ファイバとして短いものを用いた例について説明した。このため各パルス列の間に9.62  $\mu$ s の発光しない間隔が生じたが、分割数を増加させる、または遅延用ファイバをより長くして適切な長さとする、あるいはこれらを組み合わせて用いることにより、パルス間隔を完全な等間隔とすることも可能である。

【0095】

前記ファイバ増幅器168<sub>n</sub> (n=1、2、……、128)としては、ここでは、通常通信で用いられているものと同様に光ファイバのモードフィールド径（以下「モード径」という）が5～6  $\mu$ mのエルビウム（Er）・ドープ・ファイバ増幅器（EDFA）が用いられている。このファイバ増幅器168<sub>n</sub>によって、分岐及び遅延部167の各チャネルからの出力光が、所定の増幅利得に応じて増幅される。なお、このファイバ増幅器168<sub>n</sub>の励起光源等については後述する。

【0096】

前記狭帯域フィルタ169<sub>n</sub> (n=1、2、……、128)は、ファイバ増幅器168<sub>n</sub>で発生するASE光をカットし、かつDFB半導体レーザ160Aの出力波長（波長幅は1 pm程度以下）を透過させることで、透過光の波長幅を実質的に狭帯化するものである。これにより、ASE光が後段のファイバ増幅器171<sub>n</sub>に入射してレーザ光の増幅利得を低下させるのを防止し、あるいはASEノイズの伝播によるレーザ光の散乱を防止することができる。ここで、狭帯域フィルタ169<sub>n</sub>はその透過波長幅が1 pm程度であることが好ましいが、ASE光の波長幅は数十 nm程度であるので、現時点で得られる透過波長幅が100 pm程度の狭帯域フィルタを用いても実用上問題がない程度にASE光をカットすることができる。

【0097】

また、本実施形態では、後述するようにDFB半導体レーザ160Aの出力波長を積極的に変化させることがあるので、その出力波長の可変幅（本実施形態の露光装置では一例として $\pm 20 \text{ pm}$ 程度）に応じた透過波長幅（可変幅と同程度以上）を持つ狭帯域フィルタを用いておくことが好ましい。なお、露光装置に適用されるレーザ装置ではその波長幅が $1 \text{ pm}$ 程度以下に設定される。

#### 【0098】

前記光アイソレータ $170_n$  ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) は、先に説明した光アイソレータ160Bと同様に、戻り光の影響を低減するためのものである。

#### 【0099】

前記ファイバ増幅器 $171_n$  ( $n=1, 2, \dots, 128$ ) としては、ここでは、光ファイバ中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けるため光ファイバのモード径が通常通信で用いられているもの ( $5 \sim 6 \mu\text{m}$ ) よりも広い、例えば $20 \sim 30 \mu\text{m}$ の大モード径のEDFAが用いられている。このファイバ増幅器 $171_n$ は、前述したファイバ増幅器 $168_n$ で増幅された分岐及び遅延部167の各チャネルからの光出力を更に増幅する。一例として、分岐及び遅延部167での各チャネルの平均出力約 $50 \mu\text{W}$ 、全チャネルでの平均出力約 $6.3 \text{ mW}$ を2段のファイバ増幅器 $168_n$ 、 $171_n$ によって合計 $46 \text{ dB}$  ( $40600$ 倍)の増幅を行うものとする、各チャネルに対応する光経路 $172_n$ の出力端（ファイバ増幅器 $171_n$ を構成する光ファイバの出力端）では、ピーク出力 $20 \text{ kW}$ 、パルス幅 $1 \text{ ns}$ 、パルス繰り返し $100 \text{ kHz}$ 、平均出力 $2 \text{ W}$ 、全チャネルでの平均出力 $256 \text{ W}$ を得る。なお、このファイバ増幅器 $171_n$ の励起光源等についても後述する。

#### 【0100】

本実施形態では、分岐及び遅延部167での各チャネルに対応する光経路 $172_n$ の出力端、すなわちファイバ増幅器 $171_n$ を構成する各光ファイバの出力端は、バンドル状に束ねられ、図4に示されるような断面形状を有するバンドルファイバ173が形成されている。このとき、各光ファイバのクラッド直径は $125 \mu\text{m}$ 程度であることから、 $128$ 本を束ねた出力端でのバンドルの直径は約 $2 \text{ mm}$ 以下とすることができる。本実施形態では、バンドルファイバ173は

最終段のファイバ増幅器 171<sub>n</sub> の出力端をそのまま用いて形成しているが、最終段のファイバ増幅器 171<sub>n</sub> に無ドープの光ファイバを結合させ、その出力端でバンドルーファイバを形成することも可能である。

#### 【0101】

なお、標準的なモード径を持つ前段のファイバ増幅器 168<sub>n</sub> と、上記モード径の広い最終段のファイバ増幅器 171<sub>n</sub> との接続は、テーパ状にモード径が増加する光ファイバを用いて行われている。

#### 【0102】

次に、図5に基づいて各ファイバ増幅器の励起用光源等について説明する。図5には、光増幅部 161 を構成するファイバ増幅器及びその周辺部が、波長変換部 163 の一部とともに概略的に示されている。

#### 【0103】

この図5において、ファイバ増幅器 168<sub>n</sub> にはその励起用の半導体レーザ 178 がファイバー結合されるとともに、この半導体レーザ 178 の出力が波長分割多重化装置 (Wavelength Division Multiplexer: WDM) 179 を通してファイバ増幅器用ドープ・ファイバに入力し、それによりこのドープ・ファイバが励起されるようになっている。

#### 【0104】

一方大モード径をもつファイバ増幅器 171<sub>n</sub> では、上記のモード径の大きいファイバ増幅器用ドープ・ファイバを励起するための励起用光源としての半導体レーザ 174 を、ファイバ増幅器用ドープ・ファイバの径に合わせた大モード径ファイバにファイバー結合し、この半導体レーザ 174 の出力を WDM 176 を用いて、光増幅器用ドープ・ファイバに入力し、ドープ・ファイバを励起する。

#### 【0105】

この大モード径ファイバ (ファイバ増幅器) 171<sub>n</sub> で増幅されたレーザ光は波長変換部 163 に入射し、ここで紫外レーザ光に波長変換される。なお、この波長変換部 163 の構成等については後述する。

#### 【0106】

大モード径ファイバ (ファイバ増幅器) 171<sub>n</sub> を伝播する増幅されるべきレ

ーザ光（信号）は、主に基本モードであることが望ましく、これは、シングルモードあるいはモード次数の低いマルチモードファイバにおいて、主に基本モードを選択的に励起することにより実現できる。

【0107】

本実施形態では、大モード径ファイバに結合された高出力半導体レーザを、前方向から4個及び後方向から4個ファイバ結合している。ここで、励起用半導体レーザ光を効率良く光増幅用ドープ・ファイバに結合するためには、光増幅用ドープ・ファイバとして、クラッドが2重構造となったダブルクラッド構造の光ファイバを用いることが望ましい。このとき、励起用半導体レーザ光は、WDM 176により、ダブルクラッドの内側クラッドに導入される。

【0108】

前記半導体レーザ 178、174 は、光量制御装置 16C によって制御されるようになっている。

【0109】

また、本実施形態では、光経路 172<sub>n</sub> を構成する光ファイバとしてファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> が設けられているため、各ファイバ増幅器のゲインの差が各チャネルの光出力のばらつきとなる。このため、本実施形態では、各チャネルのファイバ増幅器（168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>）で出力の一部が分岐され、それぞれの分岐端に設けられた光電変換素子 180、181 によってそれぞれ光電変換されるようになっている。これらの光電変換素子 180、181 の出力信号が光量制御装置 16C に供給されるようになっている。

【0110】

光量制御装置 16C では、各ファイバ増幅器からの光出力が各増幅段で一定になるように（即ちバランスするように）、各励起用半導体レーザ（178、174）のドライブ電流をフィードバック制御するようになっている。

【0111】

さらに、本実施形態では、図 5 に示されるように、波長変換部 163 の途中でビームスプリッタにより分岐された光が光電変換素子 182 によって光電変換され、該光電変換素子 182 の出力信号が光量制御装置 16C に供給されるように

なっている。光量制御装置 16C では、この光電変換素子 182 の出力信号に基づいて波長変換部 163 における光強度をモニタし、波長変換部 163 からの光出力が所定の光出力となるように、励起用半導体レーザ 178、174 の少なくとも一方のドライブ電流をフィードバック制御する。

#### 【0112】

このような構成とすることにより、各増幅段毎に各チャネルのファイバ増幅器の増幅率が一定化されるため、各ファイバ増幅器間に偏った負荷がかかることなく全体として均一な光強度が得られる。また、波長変換部 163 における光強度をモニタすることにより、予定される所定の光強度を各増幅段にフィードバックし、所望の紫外光出力を安定して得ることができる。

#### 【0113】

なお、光量制御装置 16C については、後に更に詳述する。

#### 【0114】

上述のようにして構成された光増幅部 161 (バンドルファイバ 173 を形成する各光ファイバ出力端) からはパルス光がすべて円偏光に揃えられて出力される。これら円偏光であるパルス光は、四分の一波長板 162 (図 2 参照) によって、すべて偏光方向が同一方向となる直線偏光に変換され、次段の波長変換部 163 に入射する。

#### 【0115】

前記波長変換部 163 は、複数の非線形光学結晶を含み、前記増幅されたパルス光 (波長  $1.544\ \mu\text{m}$  の光) をその 8 倍高調波又は 10 倍高調波に波長変換して、ArF エキシマレーザと同じ出力波長 ( $193\ \text{nm}$ ) あるいは  $\text{F}_2$  レーザと同じ出力波長 ( $157\ \text{nm}$ ) のパルス紫外光を発生する。

#### 【0116】

図 6 (A)、(B) には、この波長変換部 163 の構成例が示されている。ここで、これらの図に基づいて波長変換部 163 の具体例について説明する。

#### 【0117】

図 6 (A) は、バンドルファイバ 173 の出力端から射出される波長  $1.544\ \mu\text{m}$  の基本波を、非線形光学結晶を用いて 8 倍波 (高調波) に波長変換して

、ArFエキシマレーザと同じ波長である193nmの紫外光を発生する構成例を示す。また、図6(B)は、バンドルファイバ173の出力端から射出される波長1.57 $\mu$ mの基本波を非線形光学結晶を用いて10倍波の高調波発生を行い、F<sub>2</sub>レーザと同じ波長である157nmの紫外光を発生する構成例を示す。

#### 【0118】

図6(A)の波長変換部では、基本波(波長1.544 $\mu$ m)→2倍波(波長772nm)→3倍波(波長515nm)→4倍波(波長386nm)→7倍波(波長221nm)→8倍波(波長193nm)の順に波長変換が行われる。

#### 【0119】

これを更に詳述すると、バンドルファイバ173の出力端から出力される波長1.544 $\mu$ m(周波数 $\omega$ )の基本波は、1段目の非線形光学結晶533に入射する。基本波がこの非線形光学結晶533を通る際に、2次高調波発生により基本波の周波数 $\omega$ の2倍、すなわち周波数 $2\omega$ (波長は $1/2$ の772nm)の2倍波が発生する。

#### 【0120】

この1段目の非線形光学結晶533として、LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>(LBO)結晶が用いられ、基本波を2倍波に波長変換するための位相整合にLBO結晶の温度調節による方法、NCPM(Non-Critical Phase Matching)が使用される。NCPMは、非線形光学結晶内での基本波と第二高調波との角度ずれ(Walk-off)が起らないため高効率で2倍波への変換を可能にし、また発生した2倍波はWalk-offによるビームの変形も受けないため有利である。

#### 【0121】

非線形光学結晶533で波長変換されずに透過した基本波と、波長変換で発生した2倍波とは、次段の波長板534でそれぞれ半波長、1波長の遅延が与えられて、基本波のみその偏光方向が90度回転し、2段目の非線形光学結晶536に入射する。2段目の非線形光学結晶536としてLBO結晶が用いられるとともに、そのLBO結晶は1段目の非線形光学結晶(LBO結晶)533とは温度が異なるNCPMで使用される。この非線形光学結晶536では、1段目の非線



形光学結晶 533 で発生した 2 倍波と、波長変換されずにその非線形光学結晶 533 を透過した基本波とから和周波発生により 3 倍波（波長 515 nm）を得る。

#### 【0122】

次に、非線形光学結晶 536 で得られた 3 倍波と、波長変換されずにその非線形光学結晶 536 を透過した基本波および 2 倍波とは、ダイクロイック・ミラー 537 により分離され、ここで反射された 3 倍波は集光レンズ 540、及びダイクロイック・ミラー 543 を通って 4 段目の非線形光学結晶 545 に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー 537 を透過した基本波および 2 倍波は、集光レンズ 538 を通って 3 段目の非線形光学結晶 539 に入射する。

#### 【0123】

3 段目の非線形光学結晶 539 としては LBO 結晶が用いられ、基本波が波長変換されずにその LBO 結晶を透過するとともに、2 倍波が LBO 結晶で 2 次高調波発生により 4 倍波（波長 386 nm）に変換される。非線形光学結晶 539 で得られた 4 倍波とそれを透過した基本波とは、ダイクロイック・ミラー 541 により分離され、ここを透過した基本波は集光レンズ 544 を通るとともに、ダイクロイックミラー 546 で反射されて 5 段目の非線形光学結晶 548 に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー 541 で反射された 4 倍波は、集光レンズ 542 を通ってダイクロイック・ミラー 543 に達し、ここでダイクロイック・ミラー 537 で反射された 3 倍波と同軸に合成されて 4 段目の非線形光学結晶 545 に入射する。

#### 【0124】

4 段目の非線形光学結晶 545 としては、 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$  (BBO) 結晶が用いられ、3 倍波と 4 倍波とから和周波発生により 7 倍波（波長 221 nm）を得る。非線形光学結晶 545 で得られた 7 倍波は集光レンズ 547 を通るとともに、ダイクロイック・ミラー 546 で、ダイクロイック・ミラー 541 を透過した基本波と同軸に合成されて、5 段目の非線形光学結晶 548 に入射する。

#### 【0125】

5 段目の非線形光学結晶 548 として LBO 結晶が用いられ、基本波と 7 倍波

とから和周波発生により8倍波(波長193nm)を得る。上記構成において、7倍波発生用BBO結晶545、及び8倍波発生用LBO結晶548のかわりに、 $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ (CLBO)結晶、あるいは $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (LB4)結晶を用いることも可能である。

#### 【0126】

この図6(A)の構成例では、4段目の非線形光学結晶545に3倍波と4倍波とが互いに異なる光路を通過して入射するので、3倍波を集光するレンズ540と、4倍波を集光するレンズ542とを別々の光路に置くことができる。3段目の非線形光学結晶539で発生した4倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、4段目の非線形光学結晶545で良好な変換効率を得るためには、その4倍波のビーム整形を行うことが望ましい。この場合、集光レンズ540、542を別々の光路に配置しているので、例えばレンズ542としてシリンドリカルレンズ対を用いることができ、4倍波のビーム整形を容易に行うことが可能となる。このため、4段目の非線形光学結晶(BBO結晶)545での3倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

#### 【0127】

さらに、5段目の非線形光学結晶548に入射する基本波を集光するレンズ544と、7倍波を集光するレンズ547とを別々の光路に置くことができる。4段目の非線形光学結晶545で発生した7倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、5段目の非線形光学結晶548で良好な変換効率を得るためには、その7倍波のビーム整形を行うことが好ましい。本実施例では、集光レンズ544、547を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ547としてシリンドリカルレンズ対を用いることができ、7倍波のビーム整形を容易に行うことが可能となる。このため、5段目の非線形光学結晶(LBO結晶)548での基本波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

#### 【0128】

なお、2段目の非線形光学結晶536と4段目の非線形光学結晶545との間の構成は図6(A)に限られるものではなく、非線形光学結晶536から発生し

てダイクロイック・ミラー 5 3 7 で反射される 3 倍波と、非線形光学結晶 5 3 6 から発生してダイクロイック・ミラー 5 3 7 を透過する 2 倍波を非線形光学結晶 5 3 9 で波長変換して得られる 4 倍波とが同時に非線形光学結晶 5 4 5 に入射するように、両非線形光学結晶 5 3 6、5 4 5 間の 2 つの光路長が等しくなっていれば、いかなる構成であっても構わない。このことは 3 段目の非線形光学結晶 5 3 9 と 5 段目の非線形光学結晶 5 4 8 との間でも同様である。

【0 1 2 9】

発明者の行った実験によれば、図 6 (A) の場合、各チャネル当たりの 8 倍波 (波長 1 9 3 n m) の平均出力は、4 5 . 9 m W であった。従って、全 1 2 8 チャネルを合わせたバンドルからの平均出力は 5 . 9 W となり、露光装置用光源として十分な出力の、波長 1 9 3 n m の紫外光を提供することができる。

【0 1 3 0】

この場合、8 倍波 (1 9 3 n m) の発生に、現在、市販品として良質の結晶が容易に入手可能な L B O 結晶が用いられている。この L B O 結晶は、1 9 3 n m の紫外光の吸収係数が非常に小さく、結晶の光損傷が問題とならないため耐久性の面で有利である。

【0 1 3 1】

また、8 倍波 (例えば波長 1 9 3 n m) の発生部では L B O 結晶を角度位相整合させて用いるが、この位相整合角が大きいために実効非線形光学定数 ( $d_{eff}$ ) が小さくなる。そこで、この L B O 結晶に温度制御機構を設け、L B O 結晶を高温で用いることが好ましい。これにより、位相整合角を小さくすることができる、即ち上記定数 ( $d_{eff}$ ) を増加させることができ、8 倍波発生効率を向上させることができる。

【0 1 3 2】

図 6 (B) の波長変換部では、基本波 (波長 1 . 5 7  $\mu$  m)  $\rightarrow$  2 倍波 (波長 7 8 5 n m)  $\rightarrow$  4 倍波 (波長 3 9 2 . 5 n m)  $\rightarrow$  8 倍波 (波長 1 9 6 . 2 5 n m)  $\rightarrow$  1 0 倍波 (波長 1 5 7 n m) の順に波長変換する。本構成例では 2 倍波発生から 8 倍波発生までの各波長変換段において、各波長変換段に入射された波長の 2 次高調波発生を行っている。

## 【0133】

また、本構成例では波長変換に使用する非線形光学結晶として、基本波から2次高調波発生により2倍波を発生する非線形光学結晶602としてLBO結晶を使用し、2倍波から2次高調波発生により4倍波を発生する非線形光学結晶604としてLBO結晶を使用する。さらに、4倍波から2次高調波発生により8倍波を発生する非線形光学結晶609には $\text{Sr}_2\text{Be}_2\text{B}_2\text{O}_7$  (SBBO) 結晶を使用し、2倍波と8倍波とから和周波発生により10倍波(波長157nm)を発生する非線形光学結晶611にはSBBO結晶を使用する。

## 【0134】

なお、非線形光学結晶602から発生する2倍波は、集光レンズ603を通過して非線形光学結晶604に入射し、この非線形光学結晶604は前述の4倍波と波長変換されない2倍波とを発生する。次に、ダイクロイック・ミラー605を透過する2倍波は集光レンズ606を通るとともに、ダイクロイック・ミラー607で反射されて非線形光学結晶611に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー605で反射された4倍波は、集光レンズ608を通過して非線形光学結晶609に入射し、ここで発生される8倍波は集光レンズ610、及びダイクロイック・ミラー607を通過して非線形光学結晶611に入射する。さらに非線形光学結晶611は、ダイクロイック・ミラー607で同軸に合成される2倍波と8倍波とから和周波発生により10倍波(波長157nm)を発生する。

## 【0135】

ところで、本構成例では2段目の非線形光学結晶604から発生する2倍波と4倍波とをダイクロイック・ミラー605で分岐することで、ここを透過した2倍波と、4倍波を非線形光学結晶609で波長変換して得られる8倍波とが互いに異なる光路を通過して4段目の非線形光学結晶611に入射するように構成したが、ダイクロイック・ミラー605、607を用いずに4つの非線形光学結晶602、604、609、611を同一光軸上に配置しても良い。

## 【0136】

但し、本構成例では2段目の非線形光学結晶604で発生した4倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、このビームを入力

とする 4 段目の非線形光学結晶 611 で良好な変換効率を得るためには、入射ビームとなる 4 倍波のビーム形状を整形し、2 倍波との重なりを良好にすることが望ましい。本構成例では、集光レンズ 606、608 を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ 608 としてシリンドリカルレンズを用いることが可能になり、4 倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、4 段目の非線形光学結晶 611 での 2 倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

#### 【0137】

なお、上記図 6 (A)、(B) に示される波長変換部は一例であって、本発明の波長変換部の構成がこれに限定されないことは勿論である。

#### 【0138】

図 2 に戻り、前記ビームモニタ機構 164 は、ここではファブリペロー・エタロン (Fabry-Perot etalon: 以下、「エタロン素子」ともいう)、及びフォトダイオード等の光電変換素子から成るエネルギーモニタ (いずれも図示省略) から構成されている。ビームモニタ機構 164 を構成するエタロン素子に入射した光は、エタロン素子の共鳴周波数と入射光の周波数との周波数差に対応した透過率で透過し、その透過光強度を検出するフォトダイオード等の出力信号がレーザ制御装置 16B に供給される。レーザ制御装置 16B ではこの信号に所定の信号処理を施すことにより、ビームモニタ機構 164、具体的にはエタロン素子に対する入射光の光学特性に関する情報 (具体的は、入射光の中心波長及び波長幅 (スペクトル半値幅) 等) を得る。そして、この光学特性に関する情報は、リアルタイムで主制御装置 50 に通知される。

#### 【0139】

エタロン素子の生成する透過光強度の周波数特性は、雰囲気温度や圧力の影響を受け、特にその共鳴周波数 (共鳴波長) は温度依存性がある。このため、このエタロン素子の検出結果に基づいてレーザ光源 160A から発振されるレーザ光の中心波長を精度良く制御するためには、この共鳴波長の温度依存性を調べておくことが重要である。本実施形態では、この共鳴波長の温度依存性を予め計測し、この計測結果が温度依存性マップとして主制御装置 50 に併設された記憶装

置としてのメモリ 51 (図 1 参照) に記憶されている。なお、この温度依存性マップは、メモリ 51 内にテーブルの形で持たせても良いし、関数又は係数として持たせても良い。

#### 【0140】

そして、主制御装置 50 では、ビームモニタ機構 164 の後述する絶対波長キャリブレーションの際等に、温度依存性マップに基づいて、エタロン素子の透過率が最大となる共鳴波長 (検出基準波長) が設定波長に正確に一致するようにするため、レーザ制御装置 16B に指示を与えて、ビームモニタ機構 164 内のエタロン素子の温度を積極的に制御するようになっている。

#### 【0141】

また、ビームモニタ機構 164 を構成するエネルギーモニタの出力は、主制御装置 50 に供給されており、主制御装置 50 ではエネルギーモニタの出力に基づいてレーザ光のエネルギーパワーを検出し、レーザ制御装置 16B を介して DFB 半導体レーザ 160A で発振されるレーザ光の光量を必要に応じて制御したり、DFB 半導体レーザ 160A をオフしたりする。但し、本実施形態では、後述するように、通常の光量制御 (露光量制御) は、主として光量制御装置 16C により、EOM 160C の出力パルス光のピークパワーあるいは周波数の制御、又は光増幅部 161 を構成する各ファイバ増幅器の出力光のオン・オフ制御によって行われるので、レーザ光のエネルギーパワーが何らかの原因で大きく変動した場合に主制御装置 50 がレーザ制御装置 16B を上記の如く制御することとなる。

#### 【0142】

前記吸収セル 165 は、DFB 半導体レーザ 160A の発振波長の絶対波長キャリブレーション、すなわちビームモニタ機構 164 の絶対波長キャリブレーションのための絶対波長源である。本実施形態では、この吸収セル 165 として、レーザ光源として発振波長  $1.544 \mu\text{m}$  の DFB 半導体レーザ 160A が用いられている関係から、この波長近傍の波長帯域に吸収線が密に存在するアセチレンの同位体が用いられている。

#### 【0143】

なお、後述するように、レーザ光の波長のモニタ用の光として、基本波とともに

にあるいはこれに代えて、上述した波長変換部 1 6 3 の中間波（2 倍波、3 倍波、4 倍波等）あるいは波長変換後の光を選択する場合には、それらの中間波等の波長帯域に吸収線が密に存在する吸収セルを用いれば良い。例えば、波長のモニタ用の光として、3 倍波を選択する場合には、波長 5 0 3 n m ~ 5 3 0 n m の近傍に吸収線が密に存在するヨウ素分子を吸収セルとして用い、そのヨウ素分子の適切な吸収線を選んでその波長を絶対波長とすれば良い。

---

## 【 0 1 4 4 】

また、絶対波長源としては、吸収セルに限らず、絶対波長光源を用いても良い。

## 【 0 1 4 5 】

前記レーザ制御装置 1 6 B は、主制御装置 5 0 の管理の下、ビームモニタ機構 1 6 4 の出力に基づいてレーザ光の中心波長及びスペクトル半値幅を検出し、中心波長が所望の値（設定波長）となるように D F B 半導体レーザ 1 6 0 A の温度制御及び電流制御をフィードバック制御にて行う。本実施形態では、D F B 半導体レーザ 1 6 0 A の温度を 0 . 0 0 1 ° C 単位で制御することが可能となっている。

## 【 0 1 4 6 】

また、このレーザ制御装置 1 6 B は、主制御装置 5 0 からの指示に応じて、D F B 半導体レーザ 1 6 0 A のパルス出力と連続出力との切替、及びそのパルス出力時における出力間隔やパルス幅などの制御を行うとともに、パルス光の出力変動を補償するように、D F B 半導体レーザ 1 6 0 A の発振制御を行う。

## 【 0 1 4 7 】

このようにして、レーザ制御装置 1 6 B では、発振波長を安定化して一定の波長に制御したり、あるいは出力波長を微調整する。逆に、このレーザ制御装置 1 6 B は、主制御装置 5 0 からの指示に応じて、D F B 半導体レーザ 1 6 0 A の発振波長を積極的に変化させてその出力波長を調整することもある。これについては、更に後述する。

## 【 0 1 4 8 】

次に、D F B 半導体レーザで発振されるレーザ光の波長安定化制御方法につい

て説明する。

【0149】

まず、波長安定化制御の前提となるビームモニタ機構164内のエタロン素子の絶対波長キャリブレーションについて説明する。

【0150】

前述の如く、本実施形態では、DFB半導体レーザ160Aの発振波長及びビームモニタ機構164内のエタロン素子の共鳴波長( $\lambda_{res}$ )の温度依存性が予め測定され、その測定結果がメモリ51に記憶されている。

【0151】

そこで、エタロン素子の絶対波長キャリブレーションに際して、主制御装置50では、レーザ制御装置16Bを介してDFB半導体レーザ160Aを発振させた状態で、レーザ制御装置16Bを介して吸収セル165の透過率が最大となる設定波長( $\lambda_{set}$ )に最も近い、あるいは一致する波長( $\lambda_{ref}$ )の吸収線を選択するとともに、そのときエタロン素子の透過率が最大となるように、レーザ制御装置16Bに指示を与えてビームモニタ機構164内のエタロン素子の温度を制御する。すなわち、エタロン素子の共鳴波長( $\lambda_{res}$ )が絶対波長( $\lambda_{ref}$ )を用いてキャリブレーションする。これにより、エタロン素子の検出基準波長である $\lambda_{res}$ が絶対波長( $\lambda_{ref}$ )に一致する。

【0152】

ここで、上記の絶対波長キャリブレーションを行う際に、主制御装置は、レーザ制御装置16Bを介してDFB半導体レーザ160Aの発振波長を所定範囲内で変化させることとしても良い。このようにすると、発振開始時点でDFB半導体レーザ160Aの発振波長が設定波長から大きくずれていたような場合であっても速やかに吸収セル165の透過率が最大となる設定波長( $\lambda_{set}$ )に最も近い、あるいは一致する波長( $\lambda_{ref}$ )の吸収線を選択することが可能になり、絶対波長キャリブレーションを短時間で完了することができる。

【0153】

そして、上記の絶対波長キャリブレーションが完了すると、主制御装置50ではメモリ51内に記憶されているエタロン素子の共鳴波長( $\lambda_{res}$ )の温度依存



性のデータを用いてレーザ制御装置 16B を介してエタロン素子の温度制御を行い、エタロン素子の共鳴波長 ( $\lambda_{\text{res}}$ ) を設定波長 ( $\lambda_{\text{set}}$ ) に設定する設定波長キャリブレーションを実行する。

## 【0154】

このように、本実施形態の波長安定化制御方法によると、エタロン素子の共鳴波長 ( $\lambda_{\text{res}}$ )、すなわち検出基準波長を設定波長に確実に一致させることができる。

## 【0155】

そして、それ以後は、レーザ制御装置 16B により、設定波長キャリブレーションが完了したエタロン素子の検出値 (ビームモニタ機構 164 のモニタ結果) に基づいて DFB 半導体レーザ 160A の温度制御及び電流制御がフィードバック制御にて行われるようになっている。ここで、レーザ制御装置 16B が、DFB 半導体レーザ 160A の温度制御のみでなく、供給電流 (ドライブ電流) の制御をも行うのは、電流制御による方が応答性が良いためである。

## 【0156】

前記光量制御装置 16C は、前述したように、光増幅部 161 内のファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> の光出力を検出する光電変換素子 180、181 の出力に基づいて各励起用半導体レーザ (178、174) のドライブ電流をフィードバック制御して、各増幅段毎に各チャネルのファイバ増幅器の増幅率を一定化させる機能と、波長変換部 163 途中でビームスプリッタにより分岐された光を検出する光電変換素子 182 の出力信号に基づいて、励起用半導体レーザ 178、174 の少なくとも一方のドライブ電流をフィードバック制御して予定される所定の光強度を各増幅段にフィードバックし、所望の紫外光出力を安定させる機能とを有する。

## 【0157】

更に、本実施形態では、光量制御装置 16C は、次のような機能をも有している。

## 【0158】

すなわち、光量制御装置 16C は、

- ① 主制御装置 50 からの指示に応じて、バンドルファイバ 173 を構成する各チャンネルのファイバの出力、すなわち各光経路  $172_n$  の出力を個別にオン・オフ制御することにより、バンドル全体での平均光出力の制御を行う機能（以下、便宜上「第 1 の機能」と呼ぶ）と、
- ② 主制御装置 50 からの指示に応じて、EOM 160C から出力されるパルス光の周波数を制御することにより、~~単位時間当たりの光増幅部 161 の各チャネ~~  
ルの平均光出力（出力エネルギー）、すなわち単位時間当たりの各光経路  $172_n$  からの出力光の強度を制御する機能（以下、便宜上「第 2 の機能」と呼ぶ）と、
- ③ 主制御装置 50 からの指示に応じて、EOM 160C から出力されるパルス光のピークパワーを制御することにより、単位時間当たりの光増幅部 161 の各チャンネルの平均光出力（出力エネルギー）、すなわち単位時間当たりの各光経路  $172_n$  からの出力光の強度を制御する機能（以下、便宜上「第 3 の機能」と呼ぶ）と、を有する。

【0159】

以下、上記第 1～第 3 の機能について、詳述する。

【0160】

まず、光量制御装置 16C は、上記第 1 の機能における各光経路  $172_n$  の出力のオン・オフを、各チャンネルの最終段のファイバ増幅器  $171_n$  からの出力をオン・オフすることにより行う。この場合、光量制御装置 16C では、ファイバ増幅器励起用半導体レーザ 174 をオン・オフする、すなわち半導体レーザ 174 からの励起光強度を所定レベルと零レベルとのいずれかに択一的に設定することにより行うこともできるし、半導体レーザ 174 のドライブ電流の電流値を調整することにより、半導体レーザ 174 からの励起光の強度をファイバ増幅器  $171_n$  が増幅可能状態となる第 1 レベルと、ファイバ増幅器  $171_n$  が増幅不能状態となる第 2 レベルとのいずれかに択一的に設定することにより行なうこともできる。増幅不能状態では、光の吸収が大きくなり、ファイバ増幅器からの出力は殆ど零となるので、各光経路  $172_n$  の出力がオフとなる。

【0161】

半導体レーザ 174 をオン・オフする場合には、半導体レーザ 174 をオフに

している状態では、その分の消費電力はなくなるので、エネルギーセーブが可能になる。一方、半導体レーザ 1 7 4 からの励起光強度を上記第 1 レベルと第 2 レベルとで切り換える場合には、第 1 レベルと第 2 レベルとは固定値であっても良いが、固定値でなくても良い。すなわち、ファイバ増幅器では、励起光の強度がある値を境として、上にいくか下にいくかで、増幅可能状態となるか増幅不能状態となるかが定まるからである。

#### 【0 1 6 2】

この光量制御装置 1 6 C の第 1 の機能によると、バンドル全体での平均光出力（光量）は、最大出力光量の  $1 / 1 2 8$  刻みで（約 1 % 以下毎）に制御可能である。すなわち、ダイナミックレンジが  $1 \sim 1 / 1 2 8$  という広い範囲に設定可能である。各光経路  $1 7 2_n$  は同じ構成部材を用いて構成されているので、設計上は、各光経路  $1 7 2_n$  の光出力は等しくなる筈であり、上記  $1 / 1 2 8$  刻みの光量制御はリニアリティの良いものとなる。

#### 【0 1 6 3】

また、本実施形態では、光増幅部 1 6 1 の出力、すなわちバンドルファイバ 1 7 3 の出力を波長変換する波長変換部 1 6 3 が設けられているが、この波長変換部 1 6 3 出力は、各光経路  $1 7 2_n$  の出力、すなわちファイバ増幅器  $1 7 1_n$  の出力がオンであるファイバ数に比例するため、設定光量に対し、最大出力光量の  $1 / 1 2 8$  刻みのリニアな（約 1 % ごと）制御が原則的には可能となる筈である。

#### 【0 1 6 4】

しかしながら、実際には、製造上の誤差等に起因して各光経路  $1 7 2_n$  の出力のばらつきや、各光経路  $1 7 2_n$  の出力に対する波長変換効率のばらつき等が存在する可能性が高いので、予め各光ファイバ（光経路  $1 7 2_n$ ）の出力のばらつき、及び各光ファイバ出力に対する波長変換効率のばらつきに等に起因する出力のばらつきを測定し、その測定結果に基づいて各光ファイバからの光出力のオン・オフ状況に対応する波長変換部 1 6 3 からの光出力の強度のマップ（オンにするファイバグループに対応した出力強度の換算表）である第 1 の出力強度マップを作成し、その第 1 の出力強度マップを主制御装置 5 0 に併設されたメモリ 5 1

内に格納している。なお、この第 1 の出力強度マップは、メモリ 5 1 内にテーブルの形で持たせても良いし、関数又は係数として持たせても良い。なお、後述する第 2、第 3 の出力強度マップも同様である。

#### 【0 1 6 5】

そして、光量制御装置では、本第 1 の機能により光量制御を行う際に、主制御装置 5 0 から与えられる設定光量と上記の出力強度マップとに基づいて光量制御を行うようになっている。

#### 【0 1 6 6】

また、光量制御装置 1 6 C は、上記第 2 の機能における E O M 1 6 0 C から出力されるパルス光の周波数制御を、E O M 1 6 0 C に印加する矩形波（電圧パルス）の周波数を変えることにより行う。E O M 1 6 0 C から出力されるパルス光の周波数は E O M 1 6 0 C に印加する電圧パルスの周波数に一致するため、印加電圧を制御することにより出力パルス光の周波数を制御することとしたものである。

#### 【0 1 6 7】

本実施形態の場合、前述の如く、E O M 1 6 0 C に印加する矩形波の周波数は 1 0 0 k H z である。例えば、この周波数を 1 1 0 k H z とすれば、E O M 1 6 0 C から出力される単位時間あたりの光パルス数は 1 0 % 増加し、このパルスが、前述と同様に、分岐及び遅延部 1 6 7 により各パルス毎に順次チャネル 0 からチャネル 1 2 7 の総計 1 2 8 チャネルに振り分けられる結果、各チャネルについて見ても単位時間当たりのパルス光は 1 0 % 増加し、光パルス 1 個あたりの光エネルギーが同一、すなわちパルス光のピークパワーが一定であれば、単位時間当たりの各光経路 1 7 2<sub>n</sub> の出力光強度（光量）も 1 0 % 増加する。

#### 【0 1 6 8】

また、本実施形態では、光増幅部 1 6 1 の各チャネルの出力光の波長変換を行う波長変換部 1 6 3 が設けられているが、この波長変換部 1 6 3 の単位時間当たりの出力光の光量は、ピークパワーが一定であれば、各チャネルの出力パルスの周波数に比例する。このように、本第 2 の機能による光量制御は、リニアリティに優れた制御となる。

## 【 0 1 6 9 】

但し、EOM 1 6 0 C から出力されるパルス光は、分岐及び遅延部 1 6 7 を経て、ファイバ増幅器 1 6 8<sub>n</sub>、1 7 1<sub>n</sub> の入力となるため、実際には、上述のようなりニアリティが得られるとは限らない。すなわち、一般に、ファイバ増幅器の増幅利得は、入力光強度依存性があるため、EOM 1 6 0 C の出力光の周波数を変えると、ファイバ増幅器 1 6 8<sub>n</sub>、1 7 1<sub>n</sub> の入力光強度が変化し、その結果ファイバ増幅器 1 6 8<sub>n</sub>、1 7 1<sub>n</sub> から出力されるパルス光のピークパワーが変化する可能性があるからである。ファイバ増幅器 1 6 8<sub>n</sub>、1 7 1<sub>n</sub> を適切に設計することにより、このピークパワー変化を小さく抑えることも可能ではあるが、ファイバ増幅器の光出力効率等の他の性能を低下させる場合もある。

## 【 0 1 7 0 】

そこで、本実施形態では、予めファイバ増幅器出力の入力周波数強度依存性を測定し、それに基づいて光増幅部 1 6 1 に入力するパルス光の周波数に応じた光増幅部 1 6 1 (の各チャンネル) の出力強度のマップである第 2 の出力強度マップ (EOM の出力光の周波数に対応した光増幅部 1 6 1 の出力強度の換算表) を作成し、その第 2 の出力強度マップをメモリ 5 1 に記憶している。

## 【 0 1 7 1 】

そして、光量制御装置 1 6 C では、本第 2 の機能により光量制御を行う際に、主制御装置 5 0 から与えられる設定光量と上記の第 2 の出力強度マップとに基づいて光量制御を行うようになっている。

## 【 0 1 7 2 】

また、光量制御装置 1 6 C は、上記第 3 の機能における EOM 1 6 0 C から出力されるパルス光のピークパワーの制御を、EOM 1 6 0 C へ印加する電圧パルスのピーク強度を制御することにより行う。EOM 1 6 0 C の出力光のピークパワーは EOM 1 6 0 C に印加する電圧パルスのピーク強度に依存するためである。

## 【 0 1 7 3 】

また、本実施形態では、光増幅部 1 6 1 の各チャンネルの出力光の波長変換を行う波長変換部 1 6 3 が設けられているが、この波長変換部 1 6 3 の出力光強度は

、各光ファイバ（光経路 172<sub>n</sub>）から出力されるパルス光のピーク強度に対し、最高では高調波の次数のべき乗に比例した非線形の依存を示す。例えば、図 6（A）の 8 倍波発生による 193 nm 光発生では、193 nm 光出力強度はファイバ増幅器出力のピークパワーの最大で 8 乗に比例した強度変化を示す。

## 【0174】

本実施形態の場合、EOM160C から出力されるパルス光のピークパワーの EOM160C に印加する電圧パルスのピーク強度に対する依存性は、 $\cos(V)$  であるため、結果的に上記の波長変換部 163 の非線形な依存性は緩和されるようになっている。従って、本実施形態のように波長変換部を有する光源装置では、出力光の強度（光量）制御を EOM160C へ印加する電圧パルスのピーク強度を制御することにより行うことは意味がある。

## 【0175】

但し、前述の如く、ファイバ増幅器の増幅利得は、入力光強度依存性があるため、EOM160C から出力されるパルス光のピーク強度を変えると、ファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> の入力光強度が変化し、その結果ファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> から出力されるパルス光のピークパワーが変化する場合がある。ファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub> を適切に設計することにより、このピークパワー変化を小さく抑えることも可能ではあるが、ファイバ増幅器の光出力効率等の他の性能を低下させる場合もある。

## 【0176】

そこで、本実施形態では、予めファイバ増幅器出力の入力パルスピーク強度依存性を測定し、それに基づいて光増幅部 161 に入力するパルス光のピーク強度に対応した光増幅部 161（の各チャンネル）の出力強度のマップである第 3 の出力強度マップ（EOM の出力光のピーク強度に対応した光増幅部 161 の出力パルス光の強度の換算表）を作成し、その第 3 の出力強度マップをメモリ 51 に記憶している。この第 3 の出力強度マップは波長変換部出力で紫外光強度マップであっても良い。

## 【0177】

そして、光量制御装置 16C では、本第 3 の機能により光量制御を行う際に、

主制御装置 5 0 から与えられる設定光量と上記の第 3 の出力強度マップとに基づいて光量制御を行うようになっている。

【0 1 7 8】

なお、DFB 半導体レーザ 1 6 0 A の出力段に、EOM 1 6 0 C の他に透過率制御用の EOM を設け、この EOM に印加する電圧を変化させることによりその EOM の透過率を変化させて、単位時間あたりの光増幅部、波長変換部からの放出エネルギーを変えることも可能である。

【0 1 7 9】

これまでの説明から明らかなように、光量制御装置 1 6 C による第 2、第 3 の機能では、第 1 の機能に比べて、より細やかな光源装置 1 6 の出力光の光量制御が可能である。一方、第 1 の機能は、第 2、第 3 の機能に比べて、ダイナミックレンジを広く設定することが可能である。

【0 1 8 0】

そこで、本実施形態では、後述する露光に際して、光量制御装置 1 6 C の上記第 1 の機能により露光量の粗調整を行い、第 2、第 3 の機能を用いて露光量の微調整を行うようになっている。これについては、後述する。

【0 1 8 1】

光量制御装置 1 6 C は、この他、主制御装置 5 0 からの指示に基づいてパルス出力の開始と停止なども制御する。

【0 1 8 2】

図 1 に戻り、前記照明光学系 1 2 は、ビーム整形光学系 1 8、オプティカルインテグレータ（ホモジナイザ）としてのフライアイレンズ系 2 2、照明系開口絞り板 2 4、ビームスプリッタ 2 6、第 1 リレーレンズ 2 8 A、第 2 リレーレンズ 2 8 B、固定レチクルブラインド 3 0 A、可動レチクルブラインド 3 0 B、光路折り曲げ用のミラー M 及びコンデンサレンズ 3 2 等を備えている。

【0 1 8 3】

前記ビーム整形光学系 1 8 は、光源装置 1 6 の波長変換部 1 6 3 の波長変換により発生した紫外域の光、（以下、「レーザビーム」と呼ぶ）LB の断面形状を、該レーザビーム LB の光路後方に設けられたフライアイレンズ系 2 2 に効率良

く入射するように整形するもので、例えばシリンダレンズやビームエキスパンダ（いずれも図示省略）等で構成される。

#### 【0184】

前記フライアイレンズ系22は、ビーム整形光学系18から出たレーザビームLBの光路上に配置され、レチクルRを均一な照度分布で照明するために多数の光源像からなる面光源、即ち2次光源を形成する。この2次光源から射出されるレーザビームを本明細書においては、「露光光IL」とも呼んでいる。

#### 【0185】

フライアイレンズ系22の射出面の近傍に、円板状部材から成る照明系開口絞り板24が配置されている。この照明系開口絞り板24には、等角度間隔で、例えば通常の円形開口より成る開口絞り、小さな円形開口より成りコヒーレンスファクタである $\sigma$ 値を小さくするための開口絞り、輪帯照明用の輪帯状の開口絞り、及び変形光源法用に複数の開口を偏心させて配置して成る変形開口絞り（図1ではこのうちの2種類の開口絞りのみが図示されている）等が配置されている。この照明系開口絞り板24は、主制御装置50により制御されるモータ等の駆動装置40により回転されるようになっており、これによりレチクルパターンに応じていずれかの開口絞りが露光光ILの光路上に選択的に設定される。

#### 【0186】

照明系開口絞り板24から出た露光光ILの光路上に、反射率が小さく透過率の大きなビームスプリッタ26が配置され、更にこの後方の光路上に、固定レチクルブラインド30A及び可動レチクルブラインド30Bを介在させて第1リレーレンズ28A及び第2リレーレンズ28Bから成るリレー光学系が配置されている。

#### 【0187】

固定レチクルブラインド30Aは、レチクルRのパターン面に対する共役面から僅かにデフォーカスした面に配置され、レチクルR上の照明領域42Rを規定する矩形開口が形成されている。また、この固定レチクルブラインド30Aの近傍に走査方向の位置及び幅が可変の開口部を有する可動レチクルブラインド30Bが配置され、走査露光の開始時及び終了時にその可動レチクルブラインド30



Bを介して照明領域42Rを更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。

## 【0188】

リレー光学系を構成する第2リレーレンズ28B後方の露光光ILの光路上には、当該第2リレーレンズ28Bを通過した露光光ILをレチクルRに向けて反射する折り曲げミラーMが配置され、このミラーM後方の露光光ILの光路上にコンデンサレンズ32が配置されている。

## 【0189】

更に、照明光学系12内のビームスプリッタ26で垂直に折り曲げられる一方の光路上、他方の光路上には、インテグレータセンサ46、反射光モニタ47がそれぞれ配置されている。これらインテグレータセンサ46、反射光モニタ47としては、遠紫外域及び真空紫外域で感度が良く、且つ光源装置16のパルス発光を検出するために高い応答周波数を有するSi系PIN型フォトダイオードが用いられている。なお、インテグレータセンサ46、反射光モニタ47としてGaAs系結晶を有する半導体受光素子を用いることも可能である。

## 【0190】

以上の構成において、フライアイレンズ系22の入射面、可動レチクルブラインド30Bの配置面、レチクルRのパターン面は、光学的に互いに共役に設定され、フライアイレンズ系22の射出面側に形成される光源面、投影光学系PLのフーリエ変換面（射出瞳面）は光学的に互いに共役に設定され、ケーラー照明系となっている。

## 【0191】

このようにして構成された照明系12の作用を簡単に説明すると、光源装置16からパルス発光されたレーザビームLBは、ビーム整形光学系18に入射して、ここで後方のフライアイレンズ系22に効率良く入射するようにその断面形状が整形された後、フライアイレンズ系22に入射する。これにより、フライアイレンズ系22の射出側焦点面（照明光学系12の瞳面）に2次光源が形成される。この2次光源から射出された露光光ILは、照明系開口絞り板24上のいずれかの開口絞りを通過した後、透過率が大きく反射率が小さなビームスプリッタ2

6に至る。このビームスプリッタ26を透過した露光光ILは、第1リレーレンズ28Aを経て固定レチクルブラインド30Aの矩形の開口部及び可動レチクルブラインド30Bを通過した後、第2リレーレンズ28Bを通過してミラーMによって光路が垂直下方に折り曲げられた後、コンデンサレンズ32を経て、レチクルステージRST上に保持されたレチクルR上の矩形の照明領域42Rを均一な照度分布で照明する。

---

## 【0192】

一方、ビームスプリッタ26で反射された露光光ILは、集光レンズ44を介してインテグレータセンサ46で受光され、インテグレータセンサ46の光電変換信号が、不図示のピークホールド回路及びA/D変換器を介して出力DS (digit/pulse)として主制御装置50に供給される。このインテグレータセンサ46の出力DSと、ウエハWの表面上での露光光ILの照度(露光量)との相関係数は、予め求められ、主制御装置50に併設された記憶装置としてのメモリ51内に記憶されている。

## 【0193】

また、レチクルR上の照明領域42Rを照明しそのレチクルのパターン面(図1における下面)で反射された反射光束は、コンデンサレンズ32、リレー光学系を前と逆向きに通過し、ビームスプリッタ26で反射され、集光レンズ48を介して反射光モニタ47で受光される。また、Zチルトステージ58が投影光学系PLの下方にある場合には、レチクルのパターン面を透過した露光光ILは、投影光学系PL及びウエハWの表面(あるいは後述する基準マーク板FM表面)で反射され、その反射光束は、投影光学系PL、レチクルR、コンデンサレンズ32、リレー光学系を前と逆向きに順次通過し、ビームスプリッタ26で反射され、集光レンズ48を介して反射光モニタ47で受光される。また、ビームスプリッタ26とウエハWとの間に配置される各光学素子はその表面に反射防止膜が形成されているものの、その表面で露光光ILがわずかに反射され、これら反射光も反射光モニタ47で受光される。この反射光モニタ47の光電変換信号が、不図示のピークホールド回路及びA/D変換器を介して主制御装置50に供給される。反射光モニタ47は、本実施形態では、主としてウエハWの反射率の測定

等に用いられる。なお、この反射光モニタ 4 7 を、レチクル R の透過率の事前測定の際に用いても良い。

【 0 1 9 4 】

なお、フライアイレンズ系として、例えば特開平 1 - 2 3 5 2 8 9 号公報（対応米国特許第 5, 3 0 7, 2 0 7 号）、特開平 7 - 1 4 2 3 5 4 号（対応米国特許第 5, 5 3 4, 9 7 0 号）などに開示されるダブルフライアイレンズ系を採用し、ケーラー照明系を構成しても良い。

【 0 1 9 5 】

また、フライアイレンズ系 2 2 とともに、回折光学素子 (diffractive optical element) を用いても良い。かかる回折光学素子を用いる場合には、光源装置 1 6 と照明光学系 1 2 とを回折光学素子を介して接続するようにしても良い。

【 0 1 9 6 】

すなわち、バンドルファイバの各ファイバに対応して回折素子が形成される回折光学素子をビーム整形光学系 1 8 に設け、各ファイバから出力されるレーザービームを回折させて、フライアイレンズ系 2 2 の入射面上で重畳させるようにしても良い。本実施形態では、バンドルファイバの出力端を照明光学系の瞳面に配置しても良いが、この場合には第 1 の機能（間引き）によってその瞳面上での強度分布（即ち 2 次光源の形状や大きさなど）が変化することになり、レチクルパターンに最適な形状、大きさとは異なってしまふことがある。そこで、前述の回折光学素子などを用いて照明光学系の瞳面、又はオプティカルインテグレータの入射面上で各ファイバからのレーザービームを重畳させるようにすることが望ましい。

【 0 1 9 7 】

いずれにしても、本実施形態では、前述した光量制御装置 1 6 C の第 1 の機能によりバンドルファイバ 1 7 3 の光を出力する部分の分布が変化した場合であっても、レチクル R のパターン面（物体面）上及びウエハ W の面（像面）上のいずれにおいても照度分布の均一性を十分に確保することができる。

【 0 1 9 8 】

前記レチクルステージ R S T 上にレチクル R が載置され、不図示のパキューム

チャック等を介して吸着保持されている。レチクルステージ RST は、水平面（XY 平面）内で微小駆動可能であるとともに、レチクルステージ駆動部 49 によって走査方向（ここでは図 1 の紙面左右方向である Y 方向とする）に所定ストローク範囲で走査されるようになっている。この走査中のレチクルステージ RST の位置及び回転量は、レチクルステージ RST 上に固定された移動鏡 52R を介して外部のレーザ干渉計 54R によって計測され、このレーザ干渉計 54R の計測値が主制御装置 50 に供給されるようになっている。

## 【0199】

なお、レチクル R に用いる材質は、露光光 IL の波長によって使い分ける必要がある。すなわち、波長 193 nm の露光光を用いる場合には合成石英を用いることができるが、波長 157 nm の露光光を用いる場合は、ホタル石、フッ素がドープされた合成石英、あるいは水晶などで形成する必要がある。

## 【0200】

前記投影光学系 PL は、例えば両側テレセントリックな縮小系であり、共通の Z 軸方向の光軸を有する複数枚のレンズエレメント 70a、70b、……から構成されている。また、この投影光学系 PL としては、投影倍率  $\beta$  が例えば  $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$  などのものが使用されている。このため、前記の如くして、露光光 IL によりレチクル R 上の照明領域 42R が照明されると、そのレチクル R に形成されたパターンが投影光学系 PL によって投影倍率  $\beta$  で縮小された像が表面にレジスト（感光剤）が塗布されたウエハ W 上のスリット状の露光領域 42W に投影され転写される。

## 【0201】

本実施形態では、上記のレンズエレメントのうち、複数のレンズエレメントがそれぞれ独立に移動可能となっている。例えば、レチクルステージ RST に最も近い一番上のレンズエレメント 70a は、リング状の支持部材 72 により保持され、この支持部材 72 は、伸縮可能な駆動素子、例えばピエゾ素子 74a、74b、74c（紙面奥側の駆動素子 74c は図示せず）によって、3 点支持されるとともに鏡筒部 76 と連結されている。上記の駆動素子 74a、74b、74c によって、レンズエレメント 70a の周辺 3 点を独立に、投影光学系 PL の光軸

A X方向に移動させることができるようになっている。すなわち、レンズエレメント70aを駆動素子74a, 74b, 74cの変位量に応じて光軸AXに沿って平行移動させることができるとともに、光軸AXと垂直な平面に対して任意に傾斜させることもできる。そして、これらの駆動素子74a, 74b, 74cに与えられる電圧が、主制御装置50からの指令に基づいて結像特性補正コントローラ78によって制御され、これによって駆動素子74a, 74b, 74cの変位量が制御されるようになっている。なお、図1中、投影光学系PLの光軸AXとは鏡筒部76に固定されているレンズエレメント70bその他のレンズエレメント（図示省略）の光軸を指す。

#### 【0202】

また、本実施形態では、予め実験によりレンズエレメント70aの上下量と倍率（又はディストーション）の変化量との関係を求めておき、これを主制御装置50内部のメモリに記憶しておき、補正時に主制御装置50が補正する倍率（又はディストーション）からレンズエレメント70aの上下量を計算し、結像特性補正コントローラ78に指示を与えて駆動素子74a, 74b, 74cを駆動することにより倍率（又はディストーション）補正を行うようになっている。すなわち、本実施形態では、結像特性補正コントローラ78、駆動素子74a, 74b, 74c、及び主制御装置50によって、投影光学系PLの結像特性を補正する結像特性補正装置が構成されている。

#### 【0203】

なお、前記レンズエレメント70aの上下量と倍率等の変化量との関係は光学的な計算値を用いてもよく、この場合は前記レンズエレメント70aの上下量と倍率変化量との関係を求める実験の工程が省けることになる。

#### 【0204】

前記の如く、レチクルRに最も近いレンズエレメント70aが移動可能となっているが、このエレメント70aは倍率、ディストーション特性に与える影響が他のレンズエレメントに比べて大きく制御しやすいものの1つを選択したものであって、同様の条件を満たすものであれば、このレンズエレメント70aに代えてどのレンズエレメントをレンズ間隔調整のために移動可能に構成しても良い。

## 【0205】

なお、レンズエレメント70a以外の少なくとも1つのレンズエレメントを移動して他の光学特性、例えば像面湾曲、非点収差、コマ収差、又は球面収差などを調整できるようになっている。この他、投影光学系PLの光軸方向中央部近傍の特定のレンズエレメント相互間に密封室を設け、この密封室内の気体の圧力を例えばベローズポンプ等の圧力調整機構により調整することにより、投影光学系PLの倍率を調整する結像特性補正機構を設けても良く、あるいは、例えば、投影光学系PLを構成する一部のレンズエレメントとして非球面状レンズを用い、これを回転させるようにしても良い。この場合には、いわゆるひし形ディストーションの補正が可能になる。あるいは、投影光学系PL内に平行平面板を設け、これをチルトさせたり、回転させたりするような機構により結像特性補正機構を構成しても良い。

## 【0206】

なお、露光光ILとして波長193nmのレーザ光を用いる場合には、投影光学系PLを構成する各レンズエレメント（及び上記平行平面板）としては合成石英やホタル石等を用いることができるが、波長157nmのレーザ光を用いる場合には、この投影光学系PLに使用されるレンズ等の材質は、全てホタル石が用いられる。

## 【0207】

また、本実施形態では、チャンバ11内の少なくとも大気圧を測定する環境センサ77が設けられている。この環境センサ77の計測値は、主制御装置50に供給されるようになっており、主制御装置50では、この環境センサ77の計測値に基づいて、標準大気圧からの気圧の変動を算出するとともに、投影光学系PLの結像特性の大気圧変動を算出する。そして、この大気圧変動分を考慮して結像特性補正コントローラ78に指示を与えて、投影光学系PLの結像特性を補正する。

## 【0208】

なお、主制御装置50による結像特性の大気圧変動分、照射変動分等の演算方法等については、例えば特開平9-213619号公報等に詳細に開示されてお

り、公知であるから、ここでは詳細な説明は省略する。

【0209】

前記XYステージ14は、ウエハステージ駆動部56によって走査方向であるY方向及びこれに直交するX方向（図1における紙面直交方向）に2次元駆動されるようになっている。このXYステージ14上に搭載されたZチルトステージ58上に不図示のウエハホルダを介してウエハWが真空吸着等により保持されている。Zチルトステージ58は、例えば3つのアクチュエータ（ピエゾ素子又はボイスコイルモータなど）によってウエハWのZ方向の位置（フォーカス位置）を調整すると共に、XY平面（投影光学系PLの像面）に対するウエハWの傾斜角を調整する機能を有する。また、XYステージ14の位置は、Zチルトステージ58上に固定された移動鏡52Wを介して外部のレーザ干渉計54Wにより計測され、このレーザ干渉計54Wの計測値が主制御装置50に供給されるようになっている。

【0210】

ここで、移動鏡は、実際には、X軸に垂直な反射面を有するX移動鏡とY軸に垂直な反射面を有するY移動鏡とが存在し、これに対応してレーザ干渉計もX軸位置計測用、Y軸位置計測用、及び回転（ヨーイング量、ピッチング量、ローリング量を含む）計測用のものがそれぞれ設けられているが、図1では、これらが代表的に、移動鏡52W、レーザ干渉計54Wとして示されている。

【0211】

また、Zチルトステージ58上には、ウエハWの近傍に、ウエハWの露光面と同じ高さの受光面を有し、投影光学系PLを通過した露光光ILの光量を検出するための照射量モニタ59が設けられている。照射量モニタ59は、露光領域42Wより一回り大きなX方向に延びる平面視長方形のハウジングを有し、このハウジングの中央部に露光領域42Wとほぼ同じ形状のスリット状の開口が形成されている。この開口は、実際にはハウジングの天井面を形成する合成石英等から成る受光ガラスの上面に形成された遮光膜の一部が取り除かれて形成されている。前記開口の真下にレンズを介してSi系PIN型フォトダイオード等の受光素子を有する光センサが配置されている。

## 【0212】

照射量モニタ59は、露光領域42Wに照射される露光光ILの強度測定に用いられる。照射量モニタ59を構成する受光素子の受光量に応じた光量信号が主制御装置50に供給されるようになっている。

## 【0213】

なお、光センサは、必ずしもZチルトステージ58の内部に設ける必要はなく、Zチルトステージ58の外部に光センサを配置し、リレー光学系でリレーされた照明光束を光ファイバ等を介してその光センサに導くようにしても良いことは勿論である。

## 【0214】

Zチルトステージ58上には、後述するレチクルアライメント等を行う際に使用される基準マーク板FMが設けられている。この基準マーク板FMは、その表面がウエハWの表面とほぼ同一の高さとされている。この基準マーク板FMの表面には、レチクルアライメント用基準マーク、ベースライン計測用基準マーク等の基準マークが形成されている。

## 【0215】

また、図1では図面の錯綜を避ける観点から図示が省略されているが、この露光装置10は、実際にはレチクルアライメントを行うためのレチクルアライメント系を備えている。

## 【0216】

レチクルRのアライメントを行う場合には、まず主制御装置50によりレチクルステージ駆動部49、ウエハステージ駆動部56を介してレチクルステージRST及びXYステージ14が駆動され、矩形の露光領域42W内に基準マーク板FM上のレチクルアライメント用基準マークが設定され、その基準マークにレチクルR上のレチクルマーク像がほぼ重なるようにレチクルRとZチルトステージ58との相対位置が設定される。この状態で、主制御装置50によりレチクルアライメント系を用いて両マークが撮像され、主制御装置50では、その撮像信号を処理して対応する基準マークに対するレチクルマークの投影像のX方向、Y方向の位置ずれ量を算出する。



## 【0 2 1 7】

また、上記のレチクルのアライメントの結果得られた基準マークの投影像の検出信号（画像信号）に含まれるコントラスト情報に基づいてフォーカスオフセットやレベリングオフセット（投影光学系 P L の焦点位置、像面傾斜など）を求めることも可能である。

## 【0 2 1 8】

また、本実施形態では、上記のレチクルアライメント時に、主制御装置 5 0 によって、投影光学系 P L の側面に設けられた不図示のウエハ側のオフアクシス・アライメントセンサのベースライン量の計測も行われる。すなわち、基準マーク板 F M 上には、レチクルアライメント用基準マークに対して所定の位置関係でベースライン計測用基準マークが形成されており、レチクルアライメント系を介してレチクルマークの位置ずれ量を計測する際に、そのウエハ側のアライメントセンサを介してベースライン計測用基準マークのそのアライメントセンサの検出中心に対する位置ずれ量を計測することで、アライメントセンサのベースライン量、すなわちレチクル投影位置とアライメントセンサとの相対位置関係が計測される。

## 【0 2 1 9】

更に、本実施形態の露光装置 1 0 では、図 1 に示されるように、主制御装置 5 0 によってオン・オフが制御される光源を有し、投影光学系 P L の結像面に向けて多数のピンホールまたはスリットの像を形成するための結像光束を、光軸 A X に対して斜め方向より照射する照射光学系 6 0 a と、それらの結像光束のウエハ W 表面での反射光束を受光する受光光学系 6 0 b とからなる斜入射光式の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）が設けられている。主制御装置 5 0 では、受光光学系 6 0 b 内の図示しない平行平板の反射光束の光軸に対する傾きを制御することにより、投影光学系 P L のフォーカス変動に応じて焦点検出系（6 0 a、6 0 b）にオフセットを与えてそのキャリブレーションを行う。これにより、前述の露光領域 4 2 W 内で投影光学系 P L の像面とウエハ W の表面とがその焦点深度の範囲（幅）内で合致することになる。なお、本実施形態と同様の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）の詳細な構成は、例えば特開平 6 - 2 8 3 4 0 3

号公報等に掲載されている。

#### 【0220】

走査露光時等に、主制御装置50では、受光光学系60bからの焦点ずれ信号（デフォーカス信号）、例えばSカーブ信号に基づいて焦点ずれが零となるようにZチルトステージ58のZ位置を不図示の駆動系を介して制御することにより、オートフォーカス（自動焦点合わせ）及びオートレベリングを実行する。

---

#### 【0221】

なお、受光光学系60b内に平行平板を設けて焦点検出系（60a, 60b）にオフセットを与えるようにしたのは、例えば、倍率補正のためにレンズエレメント70aを上下することによりフォーカスも変化し、また、投影光学系PLが露光光ILを吸収することにより結像特性が変化して結像面の位置が変動するので、かかる場合に焦点検出系にオフセットを与え、焦点検出系の合焦位置を投影光学系PLの結像面の位置に一致させる必要があるためである。このため、本実施形態では、レンズエレメント70aの上下量とフォーカス変化量の関係も予め実験により求め、主制御装置50内部のメモリに記憶している。なお、レンズエレメント70aの上下量とフォーカス変化量の関係は計算値を用いても良い。また、オートレベリングでは走査方向については行わず、その走査方向と直交する非走査方向のみに関して行うようにしても良い。

#### 【0222】

前記主制御装置50は、CPU（中央演算処理装置）、ROM（リード・オンリ・メモリ）、RAM（ランダム・アクセス・メモリ）等から成るいわゆるマイクロコンピュータ（又はワークステーション）を含んで構成され、これまでに説明した各種の制御を行う他、露光動作が的確に行われるように、例えばレチクルRとウエハWの同期走査、ウエハWのステッピング、露光タイミング等を制御する。また、本実施形態では、主制御装置50は、後述するように走査露光の際の露光量の制御を行ったり、投影光学系PLの結像特性の変動量を演算にて算出し、その算出結果に基づいて結像特性補正コントローラ78を介して投影光学系PLの結像特性を調整する等の他、装置全体を統括制御する。

#### 【0223】

具体的には、主制御装置 5 0 は、例えば走査露光時には、レチクル R がレチクルステージ R S T を介して + Y 方向（又は - Y 方向）に速度  $V_R = V$  で走査されるのに同期して、X Y ステージ 1 4 を介してウエハ W が露光領域 4 2 W に対して - Y 方向（又は + Y 方向）に速度  $V_W = \beta \cdot V$ （ $\beta$  はレチクル R からウエハ W に対する投影倍率）で走査されるように、レーザ干渉計 5 4 R、5 4 W の計測値に基づいてレチクルステージ駆動部 4 9、ウエハステージ駆動部 5 6 をそれぞれ介してレチクルステージ R S T、X Y ステージ 1 4 の位置及び速度をそれぞれ制御する。また、ステッピングの際には、主制御装置 5 0 ではレーザ干渉計 5 4 W の計測値に基づいてウエハステージ駆動部 5 6 を介して X Y ステージ 1 4 の位置を制御する。

#### 【 0 2 2 4 】

次に、本実施形態の露光装置 1 0 において所定枚数（N 枚）のウエハ W 上にレチクルパターンの露光を行う場合の露光シーケンスについて主制御装置 5 0 の制御動作を中心として説明する。

#### 【 0 2 2 5 】

まず、前提条件について説明する。

- ① オペレータによりコンソール等の入出力装置 6 2（図 1 参照）から入力されたショット配列、ショットサイズ、各ショットの露光順序その他の必要なデータに基づいて、予めショットマップデータ（各ショット領域の露光順序と走査方向とを定めたデータ）が作成され、メモリ 5 1（図 1 参照）内に格納されているものとする。
- ② また、インテグレータセンサ 4 6 の出力は、Z チルトステージ 5 8 上で像面（即ち、ウエハの表面）と同じ高さに設置された不図示の基準照度計の出力に対して予め較正（キャリブレーション）されているものとする。インテグレータセンサ 4 6 の較正とは、インテグレータセンサ 4 6 の出力を、像面上の露光量に変換するための変換係数（或いは変換関数）を得ることである。この変換係数を用いると、インテグレータセンサ 4 6 の出力より間接的に像面上に与えられている露光量（エネルギー）を計測できることになる。
- ③ また、上記キャリブレーションが完了したインテグレータセンサ 4 6 の出力

に対して、ビームモニタ機構 164 内のエネルギーモニタ、光増幅部 161 内の光電変換素子 180、181 及び波長変換部 163 内の光電変換素子 182 等の出力もキャリブレーションされ、インテグレータセンサ 46 の出力に対する各センサ出力の相関係数も予め求められ、メモリ 51 内に格納されている。

④ さらに、上記キャリブレーションが完了したインテグレータセンサ 46 の出力に対して反射光モニタ 47 の出力がキャリブレーションされ、インテグレータセンサ 46 の出力と反射光モニタ 47 の出力との相関係数が予め求められてメモリ 51 内に格納されているものとする。

#### 【0226】

まず、オペレータによりコンソール等の入出力装置 62（図 1 参照）から照明条件（投影光学系の開口数  $N.A.$ 、2 次光源の形状（開口絞り 24 の種類）、コヒーレンスファクタ  $\sigma$  やレチクルパターンの種類（コンタクトホール、ラインアンドスペース等）、レチクルの種類（位相差レチクル、ハーフトーンレチクル等）、及び最小線幅又は露光量許容誤差など）を含む露光条件が入力され、この入力に応じて、主制御装置 50 が、投影光学系 PL の不図示の開口絞りの設定、照明系開口絞り板 24 の開口の選択設定、レジスト感度に応じた目標積算露光量（設定光量に対応する量である）の設定等を行う。このとき、同時に主制御装置 50 では、目標積算露光量を得るための光源装置 16 からの出力光量を設定光量にはほぼ一致させるための、バンドルファイバ 173 の出力をオン、及びオフにすべきチャンネルの選択を行い、この選択指令を光量制御装置に与える。これにより、後述する走査露光の際にレーザ光源 160A の発光とほぼ同時に、光量制御装置 16C により、前述した第 1 の機能により選択指令に応じて各チャンネルのファイバ増幅器 171<sub>n</sub> のオン・オフが実行され、露光量の粗調整が実行されることとなる。

#### 【0227】

次に、主制御装置 50 では、不図示のレチクルローダを用いて露光対象のレチクル R をレチクルステージ RST 上にロードする。

#### 【0228】

次いで、前述した如く、レチクルアライメント系を用いてレチクルアライメン

トを行うとともに、ベースライン計測を行う。

【0229】

次に、主制御装置50では、不図示のウエハ搬送系にウエハWの交換を指示する。これにより、ウエハ搬送系及びXYステージ14上の不図示のウエハ受け渡し機構によってウエハ交換（ステージ上にウエハが無い場合は、単なるウエハロード）が行われ、次いでいわゆるサーチアライメント及びファインアライメント（EGA等）の一連のアライメント工程の処理を行う。これらのウエハ交換、ウエハアライメントは、公知の露光装置と同様に行われるので、ここではこれ以上の詳細な説明は省略する。

【0230】

次に、上記のアライメント結果及びショットマップデータに基づいて、ウエハW上の各ショット領域の露光のための走査開始位置にウエハWを移動させる動作と、前述した走査露光動作とを繰り返し行って、ステップ・アンド・スキャン方式でウエハW上の複数のショット領域にレチクルパターンを転写する。この走査露光中に、主制御装置50では、露光条件及びレジスト感度に応じて決定された目標積算露光量をウエハWに与えるため、インテグレータセンサ46の出力をモニタしつつ光量制御装置16Cに指令を与える。これにより、光量制御装置16Cでは、前述した第1の機能により露光量の粗調整を行うとともに、前述した第2の機能、第3の機能により、光源装置16からのレーザビーム（紫外パルス光）の周波数及びピークパワーを制御し、露光量の微調整を実行する。

【0231】

また、主制御装置50では、照明系開口絞り板24を駆動装置40を介して制御し、更にステージ系の動作情報に同期して可動レチクルブラインド30Bの開閉動作を制御する。

【0232】

1枚目のウエハWに対する露光が終了すると、主制御装置50では、不図示のウエハ搬送系にウエハWの交換を指示する。これにより、ウエハ搬送系及びXYステージ14上の不図示のウエハ受け渡し機構によってウエハ交換が行われ、以後上記と同様にしてその交換後のウエハに対してサーチアライメント、ファイン

アライメントを行う。また、この場合、主制御装置 50 により 1 枚目のウエハ W に対する露光開始からの投影光学系 P L の結像特性（フォーカスの変動を含む）の照射変動が、インテグレータセンサ 46 及び反射光モニタ 47 の計測値に基づいて求められ、この照射変動を補正するような指令値を結像特性補正コントローラ 78 に与えると同時に受光光学系 60 b にオフセットを与える。また、主制御装置 50 では、環境センサ 77 の計測値に基づいて、投影光学系 P L の結像特性の大気圧変動分等の環境変動分も求めて、これらの変動を補正するような指令値を結像特性補正コントローラ 78 に与えると同時に受光光学系 60 b にオフセットを与える。

#### 【0233】

そして、上記と同様に、このウエハ W 上の複数のショット領域にステップ・アンド・スキャン方式でレチクルパターンを転写する。そして、この 2 枚目のウエハの露光が終了すると、以後、上記と同様にして、ウエハ交換、ステップ・アンド・スキャン方式の露光が順次繰り返し行われる。

#### 【0234】

ところで、上記の N 枚のウエハ W に対する露光を行う際に、主制御装置 50 では、ビームモニタ機構 164 のモニタ結果に基づいてレーザ制御装置 16 B を介してレーザ光源 160 A の発振波長を設定波長に安定的に維持するようなフィードバック制御を行っている。このため、波長変動による投影光学系 P L の収差（結像特性）の発生、又はその変動が防止され、パターン転写中にその像特性（像質などの光学的特性）が変化することがない。

#### 【0235】

この一方、主制御装置 50 では、結像特性補正コントローラ 44 に指示を与えて駆動素子 74 a, 74 b, 74 c を駆動して投影光学系 P L の上記の大気圧変動分を含む環境変動分を補正する代わりに、1 枚目のウエハ W の露光が開始されてから所定のタイミング毎に、環境センサ 77 の計測値に基づいて標準状態からの気圧、温度、湿度等の変化を求め、その気圧、温度、湿度等の変化に起因する投影光学系 P L の結像特性の環境変動分をほぼ相殺するための波長変更量を計算で求め、該波長変更量に応じてレーザ光源 160 A の発振波長を積極的に変更す

ることとしても良い。

【0236】

かかる発振波長の変更は、主制御装置50から指示に基づき、レーザ制御装置16Bがビームモニタ機構164を構成するエタロン素子の温度を積極的に制御して、エタロン素子の透過率が最大となる共鳴波長（検出基準波長）が一致している設定波長（目標波長）を変更すると共に、この変更後の設定波長にDFB半導体レーザ160Aの発振波長が一致するように、DFB半導体レーザ160Aの温度をフィードバック制御することにより容易に達成される。

【0237】

これにより、露光装置10の稼働中に、大気圧、温度、湿度などの変化に起因して生じる投影光学系PLの収差、投影倍率、及び焦点位置などの結像特性の変動を同時に相殺することができる。すなわち、このDFB半導体レーザ160Aの発振波長の変更により、あたかも標準状態からの環境の変動がなかったかのような状態（即ち、光学性能の変動量が相殺された状態）にすることができる。

【0238】

このような波長変更、より具体的には、設定波長の変更、及びこの変更後の設定波長を基準とするレーザ光源160Aの発振波長の安定化制御は次のような場合に行われる。

【0239】

例えば大気圧を採り上げて説明すると、通常、標準大気圧は、露光装置が設置される納入先（工場など）の平均大気圧に設定されることが多い。従って、露光装置を製造する組立地と、露光装置が設置される納入先（移設地）とに標高差があるときは、例えば標準大気圧（平均大気圧など）下に投影光学系などが設置されているかのように、組立地ではその標高差に対応する波長だけ露光波長をシフトさせた上で投影光学系などの調整を行い、移設地ではその波長を露光波長に戻す、あるいは組立地では露光波長のもとで投影光学系などの調整を行い、移設地でその標高差を相殺するように露光波長をシフトさせる。他の環境条件、すなわち温度、湿度等についても同様のことが言える。これにより、組み立て地と納入先との標高差や気圧差、更には環境（クリーンルーム内の雰囲気）の違いなどに

応じて生じる投影光学系 PL の結像特性（収差など）の変動を相殺でき、納入先で露光装置の立ち上げに要する時間を短縮することが可能になる。さらに、露光装置の稼働中に、大気圧変化などに起因して生じる投影光学系 PL の収差、投影倍率、及び焦点位置などの変動も相殺でき、常に最良の結像状態でパターン像を基板上に転写することが可能となる。

#### 【0240】

このように、本実施形態では、例えば投影光学系によって照明光の波長を変更することと、その投影光学系の設置環境（周囲の気体の圧力、温度、湿度など）を変更することは実質的に等価であることを利用している。このとき、投影光学系の屈折素子の硝材の種類が単一であるときには、その等価性が完全に成立し、硝材が複数種類であってもその等価性はほぼ成立する。従って、設置環境に対する投影光学系（特に屈折素子）の屈折率の変化特性を用いて、照明光の波長のみを変化させることによって、実質的に投影光学系の設置環境が変化した場合と等価な状態を実現することができる。

#### 【0241】

なお、標準大気圧は任意で良いが、例えば投影光学系などの光学性能が最良となるようにその調整を行うときの基準となる大気圧であることが望ましく、この場合には、標準大気圧では投影光学系などの光学性能の変動量が零となる。

#### 【0242】

また、投影光学系 PL が空気以外の雰囲気中に設置される場合、大気圧とは、投影光学系 PL の周囲の雰囲気（気体）の圧力となる。すなわち、本明細書において、大気圧とは通常の意味、すなわち大気（空気）の圧力より広く、雰囲気気体の圧力を含む。

#### 【0243】

なお、主制御装置 50 では、上記の波長の変更によりキャンセルできない投影光学系 PL の結像特性の環境変動分がある場合には、主制御装置 50 では、前記設定波長の変更の度毎に、結像特性補正コントローラ 78 を介して駆動素子 74 a、74 b、74 c を駆動して設定波長の変更により補正される投影光学系 PL の環境変動分を除く、結像特性変動を補正する。これにより、投影光学系 PL の



結像特性の環境変動分の大部分が上記の設定波長の変更により補正され、投影光学系 P L の残りの環境変動分、照射変動分等が、結像特性補正コントローラ 7 8 による駆動素子 7 4 a、7 4 b、7 4 c の駆動により補正される。この結果、投影光学系 P L の結像特性をほぼ完全に補正した状態で高精度な露光が行われる。

## 【 0 2 4 4 】

更に、主制御装置 5 0 は、前記設定波長の変更間では、環境変動を考慮して結像特性変動を補正することとしても良い。設定波長の変更は上述した所定のタイミングで行われるが、この設定波長の変更間隔が長いと、その間で気圧、温度、湿度等の変動が生じるが、このような場合にもそれらに起因する投影光学系の結像特性の変動分を補正することができる。

## 【 0 2 4 5 】

ここで、前記所定のタイミングは、所定枚数のウエハ W の露光終了毎のタイミングであっても良く、ウエハ W 上の 1 ショットの露光終了の度毎のタイミングであっても良い。ここで、所定枚数は 1 枚であっても良く、1 ロットに相当する枚数であっても良い。

## 【 0 2 4 6 】

あるいは、前記所定のタイミングは、露光条件の変更の度毎のタイミングであっても良い。また、露光条件の変更とは、照明条件の変更の他、レチクルの交換等の広い意味での露光に関する条件が変更された場合の全てを含む。例えば、いわゆる二重露光時のレチクル交換や照明系開口絞りの変更と並行して波長の変更を行えば、時間ロスが殆ど殆どないので、スループットの低下を防止することができる。

## 【 0 2 4 7 】

あるいは、所定のタイミングは、環境センサ 7 7 の計測値に基づいて得られる大気圧等の物理量の変化が所定量以上変化したタイミングであっても良く、あるいは投影光学系 P L の光学性能を演算する間隔（例えば数  $\mu$  s）に合わせて、ほぼリアルタイムで行っても良い。あるいは所定のタイミングは、予め定められた所定時間毎のタイミングであっても良い。

## 【 0 2 4 8 】

更に、照射変動分の補正をも含めてレーザ光の波長変更により対処することも可能である。このとき、複数の代表的な波長毎に実験又はシミュレーションにて照射変動モデルを求めておくといよい。ここで、変更された波長が、照射変動モデルを求めた波長の間である場合は、例えば補間計算などによって結像特性又はその変動量を算出することが望ましい。

【0249】

また、波長シフトによってウエハW上に塗布されるレジスト（感光剤）の感度特性が変化することがあり、この場合、主制御装置50では、その感度特性の変化に応じて後述する積算露光のパラメータ、すなわち走査速度、照明領域の幅、照明光の強度、及び発振周波数の少なくとも1つを変更することにより露光量を制御することが望ましい。なお、複数の代表的な波長に対応して実験又はシミュレーションにてレジストの感度特性を求めておくといよく、さらに変更された波長が、感度特性を求めた波長の間であるときは、例えば補間計算などによってその感度特性を算出することが望ましい。

【0250】

なお、前述した露光量（光量）の粗調整を、実露光前にテスト発光を行い、露光量設定値に対し、1%以下の精度で制御を確実に行うようにしても良い。

【0251】

本実施形態の露光量の粗調整のダイナミックレンジは、 $1 \sim 1/128$ の範囲内で設定可能であるが、通常要求されるダイナミックレンジは、典型的には $1 \sim 1/7$ 程度であるため、光出力をオンにすべきチャンネル数（光ファイバ数）を $128 \sim 18$ の間で制御することによって行えば良い。このように、本実施形態では、各チャンネルの光出力の個別オン・オフによる露光量制御により、ウエハ毎のレジスト感度等の違いにあわせた露光量の粗調整を正確に行うことができる。

【0252】

従って、本実施形態では、従来のエキシマレーザ露光装置に用いられていたNDフィルタ等のエネルギー粗調器が不要となる。

【0253】

また、上述した光量制御装置16Cによる、第2、第3の機能による光量制御

は、制御速度が速く、制御精度が高いという特徴を持つため、以下の現状の露光装置に要求されている制御要請を確実に満たすことが可能である。

## 【 0 2 5 4 】

すなわち、同一ウエハ内における、例えばレジストの膜厚のばらつきに起因して生じる、ショット領域（チップ毎）のプロセスばらつきを補正する露光量制御のための要請である、ダイナミックレンジが設定露光量の $\pm 10\%$ 程度、ショット間ステップング時間である $100\text{ms}$ 程度の時間内に設定値に制御すること、制御精度として設定露光量の $\pm 1\%$ 程度、1ショット領域の線幅均一性を実現するための露光制御のための要請である、制御精度として典型的には1ショットの露光時間である $20\text{ms}$ 程度の時間内に設定露光量の $\pm 0.2\%$ に設定すること、制御速度 $1\text{ms}$ 程度、の全てを満たす。

## 【 0 2 5 5 】

従って、露光量制御のためには、光量制御装置 16 C では、第 2、第 3 の機能による光量制御の少なくとも一方を行えば足りる。

## 【 0 2 5 6 】

また、本実施形態の露光装置 10 のようなレーザ光源（パルス光源）を有する走査型露光装置では、ウエハ W の走査速度（スキャン速度）を  $V_W$ 、ウエハ W 上のスリット状の露光領域 42 W の走査方向の幅（スリット幅）を D、レーザ光源のパルスの繰り返し周波数を F とすると、パルス発光間にウエハ W が移動する間隔は  $V_W/F$  であるため、ウエハ上の 1 点あたりに照射すべき露光光 I L のパルス数（露光パルス数）N は次式（3）で表される。

## 【 0 2 5 7 】

$$N = D / (V_W / F) \quad \dots\dots (3)$$

## 【 0 2 5 8 】

パルスエネルギーを P とすると、単位時間にウエハ上の 1 点あたりに与えられるべきエネルギーは、次式（4）で表される。

## 【 0 2 5 9 】

$$E = NP = ND / (V_W / F) \quad \dots\dots (4)$$

## 【 0 2 6 0 】

従って、走査型露光装置では、スリット幅 $D$ 、スキャン速度 $V_w$ 、レーザ光源のパルスの繰り返し周波数 $F$ 、パルスエネルギー $P$ のいずれかを制御することにより、露光量（積算露光量）の制御が可能である。応答速度の問題から走査露光中にスリット幅 $D$ を調整することには難点があるので、スキャン速度 $V_w$ 、レーザ光源のパルスの繰り返し周波数 $F$ 、パルスエネルギー $P$ のいずれかを制御すれば良い。

#### 【0261】

従って、本実施形態の露光装置10においても、光量制御装置16Cの第2、第3の機能による光量制御のいずれかと、スキャン速度とを組み合わせ、露光量を制御するようにしても、勿論良い。

#### 【0262】

例えば、ウエハ $W$ 上に転写すべきレチクルパターンに応じてウエハ $W$ の露光条件を変更する、例えば照明光学系の瞳面上での照明光の強度分布（即ち2次光源の形状や大きさ）を変化させたり、あるいは投影光学系 $PL$ のほぼ瞳面上でその光軸を中心とする円形領域を遮光する光学フィルタを挿脱する。この露光条件の変更によってウエハ $W$ 上での照度が増減するが、このことはレチクルパターンの変更によっても生じる。これは、パターンの遮光部（又は透過部）の占有面積の違いによるものである。そこで、露光条件及びレチクルパターンの少なくとも一方の変更によって照度が増減するときは、ウエハ（レジスト）に適正な露光量が与えられるように、前述した周波数とピークパワーとの少なくとも一方を制御することが望ましい。このとき、周波数及びピークパワーの少なくとも一方に加えてレチクル及びウエハの走査速度を調整するようにしても良い。

#### 【0263】

これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、主制御装置50によって、第1の制御装置、第2の制御装置、第3の制御装置のすべてが実現されているが、これらの制御装置を別々の制御装置によって構成しても良いことは勿論である。

#### 【0264】

以上説明したように、本実施形態に係る光源装置16によると、レーザ光の波

長を検出する波長検出装置（具体的には、ビームモニタ機構 164 内のエタロン素子）の検出基準波長（共鳴波長）の温度依存性が DFB 半導体レーザ 16B の発振波長の温度依存性とともにより計測され、それらのデータから成る温度依存性マップがメモリに記憶されている。そして、主制御装置 50 では、吸収セル 165 から提供される絶対波長に対してビームモニタ機構 164 の検出基準波長（エタロン素子の共鳴波長）をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行うとともに、前記温度依存性マップに基づいて前記検出基準波長を設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションを行う。このように、本実施形態の光源装置によると、既知のビームモニタ機構 164 の検出基準波長の温度依存性のデータを含む温度依存性マップを用いて、絶対波長キャリブレーション後のビームモニタ機構 164 の検出基準波長を設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションが行われる。このため、常に確実にビームモニタ機構 164 の検出基準波長を設定波長に正確に設定することができ、これによりビームモニタ機構 164 の雰囲気温度等が変動しても、それに影響を受けることなく、ビームモニタ機構 164 を用いてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御が可能になる。

#### 【0265】

また、主制御装置 50 は、レーザ制御装置 16B を介してビームモニタ機構 164 を構成するエタロン素子（ファブリペロー・エタロン）の温度を制御することにより、検出基準波長の絶対波長キャリブレーション及び設定波長キャリブレーションを行うので、エタロン素子の波長検出の基準となる共鳴波長の温度依存性を利用して、その検出基準波長を設定波長に設定することが可能となる。

#### 【0266】

また、主制御装置 50 は、絶対波長キャリブレーションを行うに際し、レーザ制御装置 16B を介してレーザ光源 160A の波長制御をも併せて行うようになっていることから、絶対波長キャリブレーションを、レーザ光の波長制御を行わない場合に比べて短時間で完了することができる。但し、絶対波長キャリブレーションを行うに際し、レーザ光源 160A の波長制御を必ずしも行う必要はない。

## 【0267】

また、主制御装置 50 は、前記設定波長キャリブレーションの終了後に、その設定波長キャリブレーションが終了したビームモニタ機構 164 のモニタ結果に基づいて、レーザ制御装置 16B を介してレーザ光源 160A からのレーザ光の波長をフィードバック制御するようになっている。このため、主制御装置 50 により、その検出基準波長が設定波長に正確に設定されたビームモニタ機構 164

のモニタ結果に基づいて、レーザ制御装置 16B を介してレーザ光源 160A からのレーザ光の波長が制御されることとなり、これによりそのレーザ光の波長を設定波長に安定的に維持することができる。

## 【0268】

また、本実施形態に係る光源装置 16 は、レーザ光源 160A からのレーザ光を増幅するファイバ増幅器 168<sub>n</sub>、171<sub>n</sub>を含む光増幅部 161 を備えていることから、それらのファイバ増幅器によりレーザ光源 160A からのレーザ光を増幅することができる。このため、小型の DFB 半導体レーザ、ファイバーレーザ等の固体レーザをレーザ光源 160A として用いても、出力光の強度を十分に高く設定することができる。また、光源装置 16 は、前記増幅されたレーザ光の波長を変換する非線形光学結晶を含む波長変換部 163 を備え、波長変換部 163 により光増幅部 161 から発生される波長 1.5  $\mu$ m 近傍のレーザ光の波長変換を行って、ArF エキシマレーザ光と同一波長の波長 193 nm の 8 倍高調波、又は F<sub>2</sub> レーザ光と同一波長の 10 高調波を発生することができる。従って、光源装置 160 により、小型・軽量で短波長の高いエネルギービームを出力する優れた光源装置が実現されている。

## 【0269】

また、本実施形態に係る光源装置 16 は、複数の光経路それぞれからの光出力を個別に遅延させて、光出力を時間的にずらして行わせる分岐及び遅延部 167 を備えているので、各光経路から出力される光が時間的に重なることがなくなるので、結果的に該光源装置 16 からの出力光は、極めて狭帯域化された単一波長の光でありながら、お互いに時間的に重なり合うことがなく、各チャンネル出力間の空間的コヒーレンスを低減することができる。

## 【0270】

本実施形態に係る露光装置 10 によると、主制御装置 50 では、露光に先立って、前述した絶対波長キャリブレーション、及びそれに続く設定波長キャリブレーションを行い、露光中は、その設定波長キャリブレーションが終了したビームモニタ機構のモニタ結果に基づいてレーザ制御装置 16B を介してレーザ光源 160A の温度及び電流をフィードバック制御する。すなわち、主制御装置 50 では、設定波長キャリブレーションが終了したビームモニタ機構 164 のモニタ結果に基づいてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御を行いつつ、レーザ光をレチクル R に照射して該レチクル R のパターンを投影光学系 PL を介してウエハ W に転写するので、雰囲気温度変動等の影響の少ない高精度な露光が可能になる。

## 【0271】

また、露光装置 10 によると、主制御装置 50 が、ウエハ W の露光が開始されてから前述した所定のタイミング毎に、環境センサ 77 の計測値に基づいて標準状態からの環境の変化（気圧、温度、湿度等）の変化に起因する投影光学系 PL の結像特性の変動分をほぼ相殺するための波長変更量を計算で求め、該波長変更量に応じて設定波長を変更する。この結果、投影光学系 PL の諸収差が同時に補正され、主制御装置 50 では、その変更後の設定波長を基準としてビームモニタ機構 164 を用いてレーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御を行いつつ、レーザ光をレチクル R に照射して露光、すなわち、レチクルパターンの投影光学系 PL を介したウエハ W 上への転写を行う。この場合、結果的に環境の変動が存在しなかったかのような状態（すなわち、光学性能の変動が相殺された状態）で、精度良く露光が行われることとなる。

## 【0272】

また、本実施形態の露光装置 10 では、主制御装置 50 では、前記設定波長の変更の度毎に、結像特性補正コントローラ 78 を介して駆動素子 74a、74b、74c を駆動して設定波長の変更により補正される投影光学系 PL の環境変動分を除く、結像特性変動を補正する。これにより、投影光学系 PL の結像特性の環境変動分の大部分が上記の設定波長の変更により補正され、投影光学系 PL の

残りの環境変動分、照射変動分、温度変動分等が、結像特性補正コントローラ78による駆動素子74a、74b、74cの駆動により補正される。この結果、投影光学系PLの結像特性をほぼ完全に補正した状態で高精度な露光が行われる。

#### 【0273】

また、本実施形態に係る露光装置10によると、照明光学系12により光源装置16の波長変換部163から出力される紫外光（波長193nm又は157nm）を露光用照明光としてレチクルRが照明され、該レチクルRに形成されたパターンがウエハW上に転写される。この場合、光源装置16により、レチクルRに照射される紫外光の光量制御を必要な要請に応じて行うことができるので、結果的に要求される露光量制御を実現することができる。

#### 【0274】

また、露光装置10によると、光発生部160では、光源160Aで発生した単一波長の光をEOM160Cによりパルス光に変換することによりパルス光を発生し、そのパルス光がファイバ増幅器を含む光増幅部161によって増幅される。そして、主制御装置50により、その増幅されたパルス光をレチクルRに照射して、該レチクルを介してウエハWを露光する際に、その露光対象領域のウエハ上の位置、すなわち各ショット領域のウエハ上の位置又は各ショット内のスリット状照明領域で照明される領域の位置に応じてEOM160Cを介してパルス光の周波数及びピークパワーの少なくとも一方が光量制御装置16Cを介して制御され、これによりレチクルRに照射される光量、ひいてはウエハの露光量が高精度に制御される。従って、ウエハ上の露光対象領域の位置によらず、常に適切な露光量制御が可能となり、精度良くマスクのパターンを基板上に転写することが可能になる。すなわち、ウエハ上の各ショット領域毎のプロセスばらつきの補正や各ショット領域内の線幅均一性の向上が可能になる。

#### 【0275】

また、本実施形態に係る露光装置によると、主制御装置50により、前記の如く、増幅されたパルス光をレチクルRに照射して、該レチクルRを介してウエハWを露光する際に、各光経路172<sub>n</sub>からの光出力を個別にオン・オフすること



により光増幅部 1 6 1 から出力されるパルス光の光量が光量制御装置 1 6 C を介して制御され、これによりレチクル R に照射される光量、ひいてはウエハの露光量が広い範囲に渡って段階的に制御される。従って、複数枚のウエハを繰り返し露光する際のウエハ毎のレジスト感度等の違いに合わせた露光量制御が可能になる。従って、レジスト感度等に影響を受けることなく、ウエハ上にレチクルパターンを要求される精度で転写することが可能になる。

## 【 0 2 7 6 】

なお、上記実施形態では、レーザ光源 1 6 0 A の発振波長の制御のため、レーザ光源 1 6 0 A の直後でそのレーザ光をビームモニタ機構 1 6 4 によりモニタするものとしたが、これに限らず、例えば図 5 中に点線で示されるように、波長変換部 1 6 3 内（あるいは波長変換部 1 6 3 の後方）で光束を分岐して、これをビームモニタ機構 1 6 4 と同様のビームモニタ機構 1 8 3 でモニタするようにしても良い。そして、このビームモニタ機構 1 8 3 によるモニタ結果に基づいて、波長変換が正確に行われているか否かを検出し、この検出結果に基づいて主制御装置 5 0 がレーザ制御装置 1 6 B をフィードバック制御するようにしても良い。勿論、両方のビームモニタ機構のモニタ結果を用いてレーザ光源 1 6 0 A の発振波長制御を行っても良い。さらに、前述した投影光学系 P L の環境（例えば大気圧を少なくとも含む）変動分を補正するための設定波長の変更の際に、ビームモニタ機構 1 8 3 を構成するエタロン素子の検出基準波長をその設定波長に変更することとしても良い。

## 【 0 2 7 7 】

なお、上記実施形態中で説明した波長検出装置の共鳴波長温度依存性の代わりに、波長検出装置を構成するファブリペロー・エタロンの共振器長をピエゾ素子などで可変にし、共鳴波長の共振器長依存性を使用するようにしても良い。これにより高速で波長を変更することが可能となる。

## 【 0 2 7 8 】

なお、上記実施形態では、バンドルファイバを形成するファイバの本数を 1 2 8 本としたが、その本数は任意でよく、本発明に係る光源装置が適用される製品、例えば露光装置で要求される仕様（ウエハ上での照度）、及び光学性能、即

ち照明光学系や投影光学系の透過率、波長変換部の変換効率、及び各ファイバの出力などに応じてその本数を決定すればよい。さらに上記実施形態では、紫外光の波長を、ArFエキシマレーザ又はF<sub>2</sub>レーザの波長とほぼ同一に設定するものとしたが、その設定波長は任意で良く、この設定すべき波長に応じて、レーザ光源160Aの発振波長や波長変換部の構成及び高調波の倍率などを決定すれば良い。なお、設定波長は、一例として、ウェハ上に転写すべきパターンのデザインルール（線幅、ピッチなど）に応じて決定するようにしても良く、更にはその決定に際して前述の露光条件やレチクルの種類（位相シフト型か否か）などを考慮しても良い。

## 【0279】

また、上記実施形態中では特に説明をしなかったが、本実施形態のように、193nm以下の露光波長により露光を行う装置の場合には、光束通過部分にはケミカルフィルタを通過したクリーンエアーや、ドライエアー、N<sub>2</sub>ガス、若しくはヘリウム、アルゴン、クリプトン等の不活性ガスを充填させあるいはフローさせたり、該光束通過部分を真空にする等の処置が必要となる。

## 【0280】

上記実施形態の露光装置は、本願の特許請求の範囲に挙げられた各構成要素を含む各種サブシステムを、所定の機械的精度、電気的精度、光学的精度を保つように、組み立てることで製造される。これら各種精度を確保するために、この組み立ての前後には、各種光学系については光学的精度を達成するための調整、各種機械系については機械的精度を達成するための調整、各種電気系については電気的精度を達成するための調整が行われる。各種サブシステムから露光装置への組み立て工程は、各種サブシステム相互の、機械的接続、電気回路の配線接続、気圧回路の配管接続等が含まれる。この各種サブシステムから露光装置への組み立て工程の前に、各サブシステム個々の組み立て工程があることは言うまでもない。各種サブシステムの露光装置への組み立て工程が終了したら、総合調整が行われ、露光装置全体としての各種精度が確保される。なお、露光装置の製造は温度およびクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

## 【0281】

また、上記実施形態では、本発明に係る光源装置がステップ・アンド・スキャン方式の走査型露光装置に適用された場合について説明したが、露光装置以外の装置、例えば、ウエハ上に形成された回路パターンの一部（ヒューズなど）を切断するために用いられるレーザーリペア装置などにも本発明に係る光源装置を適用することができる。また、本発明に係る光源装置は可視光または赤外光を用いる検査装置などにも適用することができる。そしてこの場合には前述の波長変換部を光源装置に組み込む必要がない。すなわち、本発明は紫外レーザー装置だけでなく、可視域または赤外域の基本波を発生する、波長変換部がないレーザー装置に対しても有効なものである。また、本発明は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型露光装置に限らず、静止露光型、例えばステップ・アンド・リピート方式の露光装置（ステッパなど）にも好適に適用できるものである。更にはステップ・アンド・スティッチ方式の露光装置、ミラープロジェクション・アライナーなどにも適用できる。

## 【0282】

なお、上記実施形態で示した投影光学系や、照明光学系はほんの一例であって、本発明がこれに限定されないことは勿論である。例えば、投影光学系として屈折光学系に限らず、反射光学素子のみからなる反射系、又は反射光学素子と屈折光学素子とを有する反射屈折系（カタディオプトリック系）を採用しても良い。波長200nm程度以下の真空紫外光（VUV光）を用いる露光装置では、投影光学系として反射屈折系を用いることも考えられる。この反射屈折型の投影光学系としては、例えば特開平8-171054号公報及び特開平10-20195号公報などに開示される、反射光学素子としてビームスプリッタと凹面鏡とを有する反射屈折系、又は特開平8-334695号公報及び特開平10-3039号公報などに開示される、反射光学素子としてビームスプリッタを用いずに凹面鏡などを有する反射屈折系を用いることができる。

## 【0283】

この他、米国特許第5,488,229号、及び特開平10-104513号公報に開示される、複数の屈折光学素子と2枚のミラー（凹面鏡である主鏡と、屈折素子又は平行平板の入射面と反対側に反射面が形成される裏面鏡である副

鏡)とを同一軸上に配置し、その複数の屈折光学素子によって形成されるレチクルパターンの中間像を、主鏡と副鏡とによってウエハ上に再結像させる反射屈折系を用いても良い。この反射屈折系では、複数の屈折光学素子に続けて主鏡と副鏡とが配置され、照明光が主鏡の一部を通して副鏡、主鏡の順に反射され、さらに副鏡の一部を通してウエハ上に達することになる。

【0284】

また、上記実施形態では、オプティカルインテグレータ(ホモジナイザ)としてフライアイレンズ系を用いるものとしたが、その代わりにロッド・インテグレータを用いるようにしてもよい。ロッド・インテグレータを用いる照明光学系では、ロッド・インテグレータはその射出面がレチクルRのパターン面とほぼ共役になるように配置されるので、例えばロッド・インテグレータの射出面に近接して前述の固定レチクルブラインド30Aや可動レチクルブラインド30Bを配置しても良い。

【0285】

勿論、半導体素子の製造に用いられる露光装置だけでなく、液晶表示素子などを含むディスプレイの製造に用いられる、デバイスパターンをガラスプレート上に転写する露光装置、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられる、デバイスパターンをセラミックウエハ上に転写する露光装置、及び撮像素子(CCDなど)の製造に用いられる露光装置などにも本発明を適用することができる。

【0286】

#### 《デバイス製造方法》

【0287】

次に、上述した露光装置をリソグラフィ工程で使用したデバイスの製造方法の実施形態について説明する。

【0288】

図7には、デバイス(ICやLSI等の半導体チップ、液晶パネル、CCD、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン等)の製造例のフローチャートが示されている。図7に示されるように、まず、ステップ201(設計ステップ)において、デバイスの機能・性能設計(例えば、半導体デバイスの回路設計等)を行い、その

機能を実現するためのパターン設計を行う。引き続き、ステップ 2 0 2（マスク製作ステップ）において、設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。一方、ステップ 2 0 3（ウエハ製造ステップ）において、シリコン等の材料を用いてウエハを製造する。

#### 【0 2 8 9】

次に、ステップ 2 0 4（ウエハ処理ステップ）において、ステップ 2 0 1～ステップ 2 0 3 で用意したマスクとウエハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術等によってウエハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップ 2 0 5（デバイス組立ステップ）において、ステップ 2 0 4 で処理されたウエハを用いてデバイス組立を行う。このステップ 2 0 5 には、ダイシング工程、ボンディング工程、及びパッケージング工程（チップ封入）等の工程が必要に応じて含まれる。

#### 【0 2 9 0】

最後に、ステップ 2 0 6（検査ステップ）において、ステップ 2 0 5 で作製されたデバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にデバイスが完成し、これが出荷される。

#### 【0 2 9 1】

図 8 には、半導体デバイスの場合における、上記ステップ 2 0 4 の詳細なフロー一例が示されている。図 8 において、ステップ 2 1 1（酸化ステップ）においてはウエハの表面を酸化させる。ステップ 2 1 2（CVD ステップ）においてはウエハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ 2 1 3（電極形成ステップ）においてはウエハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ 2 1 4（イオン打込みステップ）においてはウエハにイオンを打ち込む。以上のステップ 2 1 1～ステップ 2 1 4 それぞれは、ウエハ処理の各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

#### 【0 2 9 2】

ウエハプロセスの各段階において、上述の前処理工程が終了すると、以下のようにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、まず、ステップ 2 1 5（レジスト形成ステップ）において、ウエハに感光剤を塗布する。引き続き、ス

ステップ 216（露光ステップ）において、上で説明した露光装置 10 を用いてマスクの回路パターンをウエハに転写する。次に、ステップ 217（現像ステップ）においては露光されたウエハを現像し、ステップ 218（エッチングステップ）において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップ 219（レジスト除去ステップ）において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。

---

## 【0293】

これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返し行うことによって、ウエハ上に多重に回路パターンが形成される。

## 【0294】

以上説明した本実施形態のデバイス製造方法によると、露光工程（ステップ 216）において上記実施形態の露光装置 10 を用いて露光が行われるので、露光精度の向上により、高集積度のデバイスを歩留まり良く生産することができる。

## 【0295】

## 【発明の効果】

以上説明したように、請求項 1～6 に記載の各発明によれば、レーザー光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持することができる波長安定化制御方法を提供することができる。

## 【0296】

また、請求項 7～13 に記載の各発明によれば、レーザー光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持することができる光源装置を提供することができる。

## 【0297】

また、請求項 14 及び 15 に記載の各発明によれば、雰囲気温度変動等に影響されず、高精度な露光を行うことができる露光方法を提供することができる。

## 【0298】

また、請求項 16～23 に記載の各発明によれば、雰囲気温度変動等に影響されず、高精度な露光を行うことができる露光装置を提供することができる。

## 【0299】

また、請求項 24 及び 25 に記載の各発明によれば、高集積度のマイクロデバ

イスの生産性を向上することができるデバイス製造方法を提供することができる。

### 【0300】

また、請求項28に記載の発明によれば、エネルギービームの中心波長の変更に伴う感光剤の感度特性の変化によらず、精度良く露光を行うことができるという効果がある。

### 【図面の簡単な説明】

#### 【図1】

本発明の一実施形態に係る露光装置の構成を概略的に示す図である。

#### 【図2】

図1の光源装置の内部構成を主制御装置とともに示すブロック図である。

#### 【図3】

図2の光増幅部の構成を概略的に示す図である。

#### 【図4】

光増幅部を構成する最終段のファイバ増幅器の出力端部が束ねられて形成されたバンドルファイバの断面を示す図である。

#### 【図5】

図2の光増幅部を構成するファイバ増幅器及びその周辺部を、波長変換部の一部とともに概略的に示す図である。

#### 【図6】

図6(A)は、バンドルファイバ173の出力端から射出される波長 $1.544\mu\text{m}$ の基本波を、非線形光学結晶を用いて8倍波(高調波)に波長変換して $193\text{nm}$ の紫外光を発生する波長変換部の構成例を示す図、図6(B)は、バンドルファイバ173の出力端から射出される波長 $1.57\mu\text{m}$ の基本波を非線形光学結晶を用いて10倍波に波長変換して $157\text{nm}$ の紫外光を発生する波長変換部の構成例を示す図である。

#### 【図7】

本発明に係るデバイス製造方法の実施形態を説明するためのフローチャートである。

## 【図 8】

図 7 のステップ 204 における処理を示すフローチャートである。

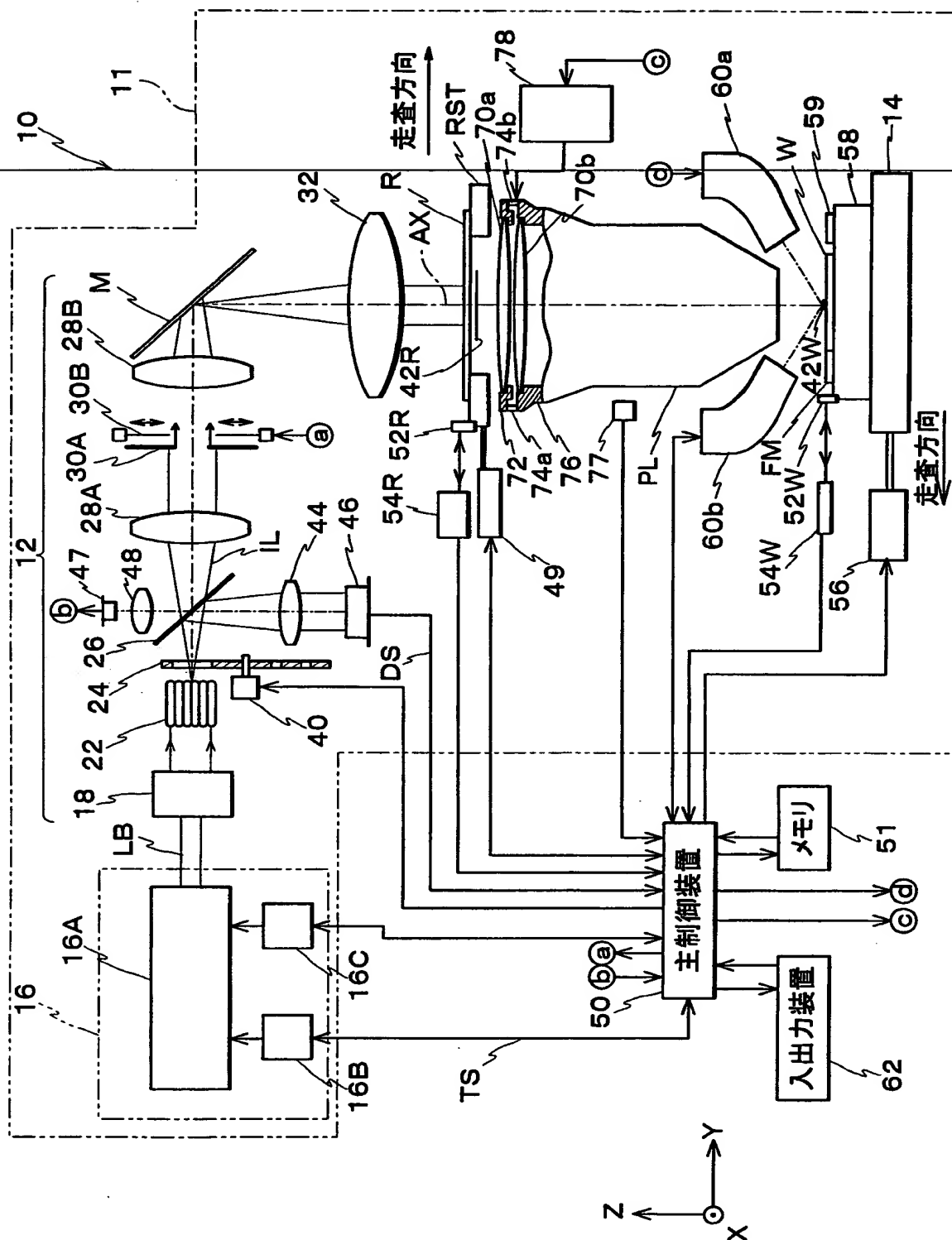
## 【符号の説明】

10…露光装置、12…照明光学系（光学系）、16…光源装置、50…主制御装置（1の制御装置、第2の制御装置、第3の制御装置、結像特性補正装置の一部）、51…メモリ（記憶装置）、74a、74b…駆動素子（結像特性補正装置の一部）、77…環境センサ、78…結像特性補正コントローラ（結像特性補正装置の一部）、160A…DFB半導体レーザ（レーザ光源）、163…波長変換部（波長変換器）、164…ビームモニタ機構（波長検出装置）、165…吸収セル（絶対波長提供源）、168<sub>n</sub>…ファイバ増幅器、171<sub>n</sub>…ファイバ増幅器、W…ウエハ（基板）、PL…投影光学系（光学系）、R…レチクル（マスク）。

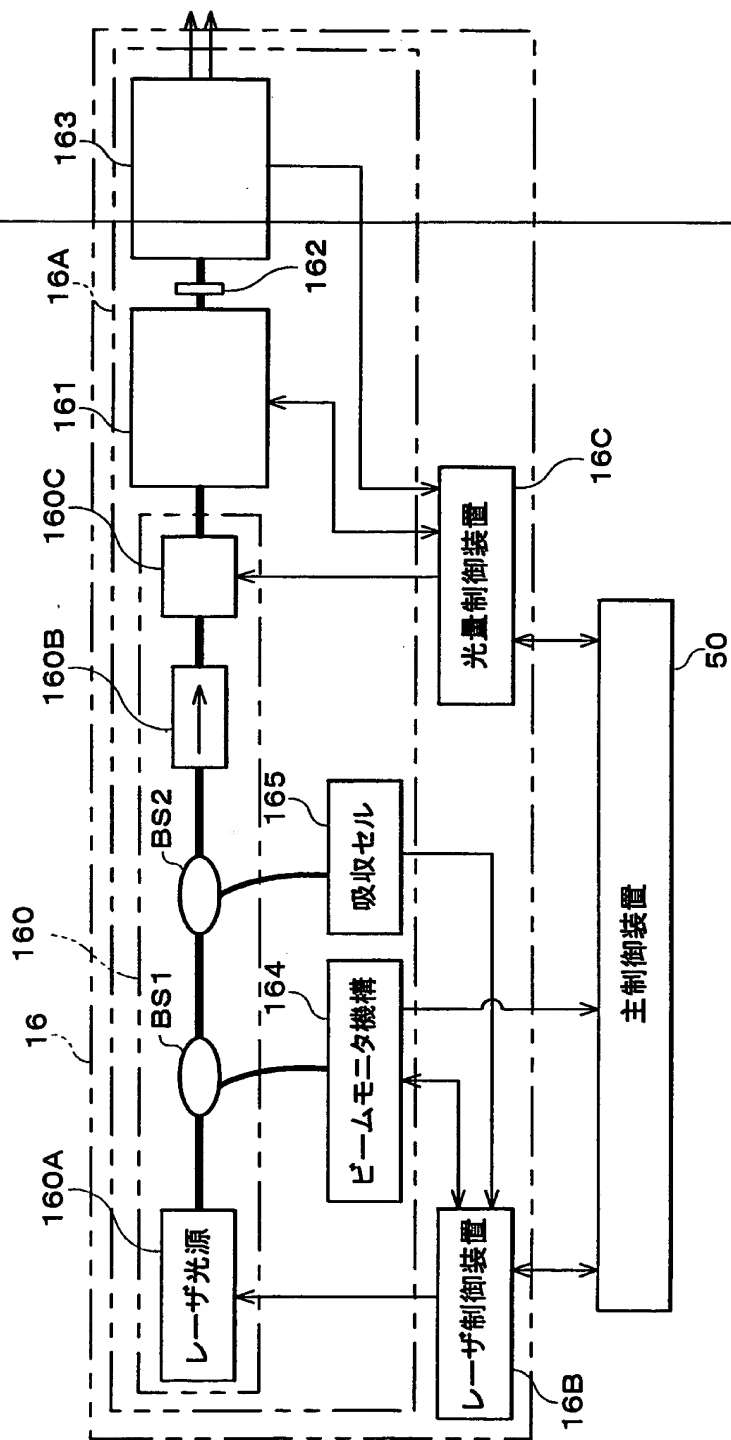


【書類名】 図面

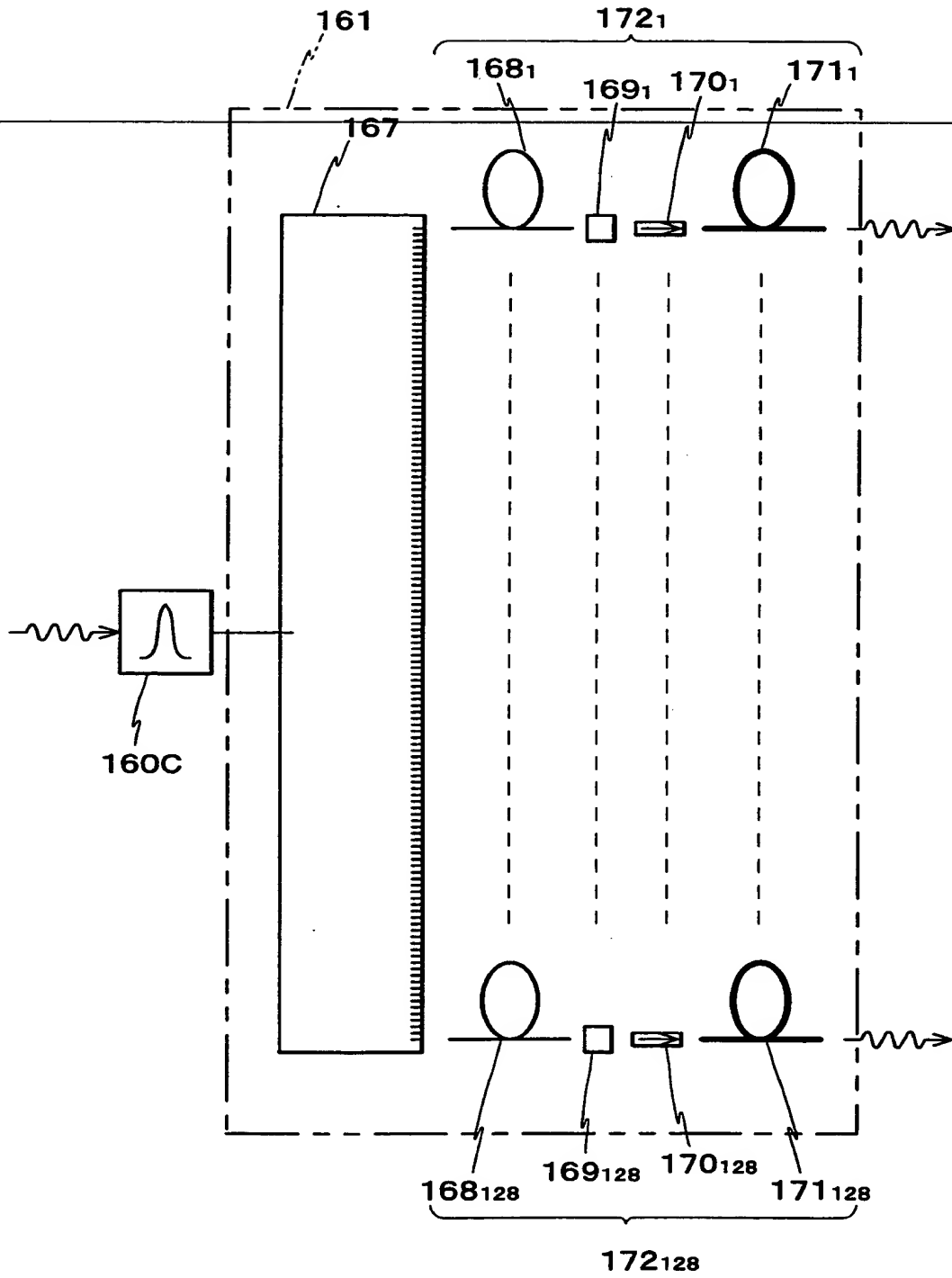
【圖 1】



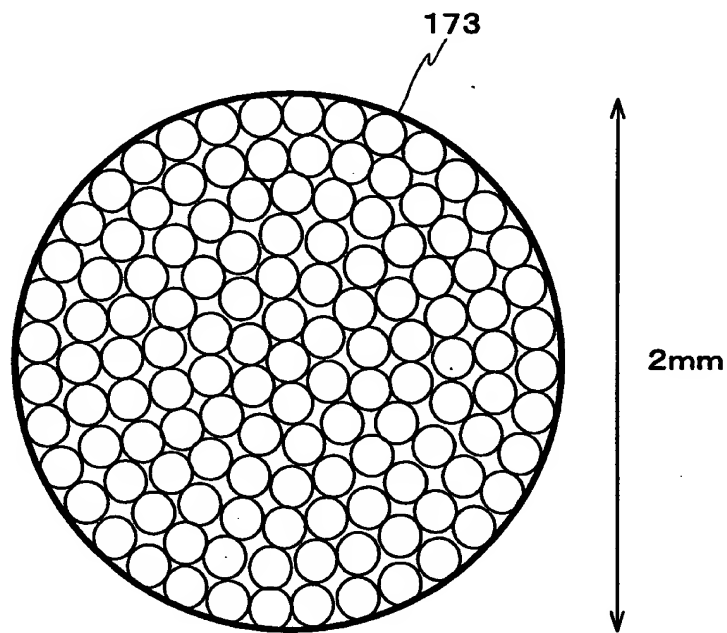
【図 2】



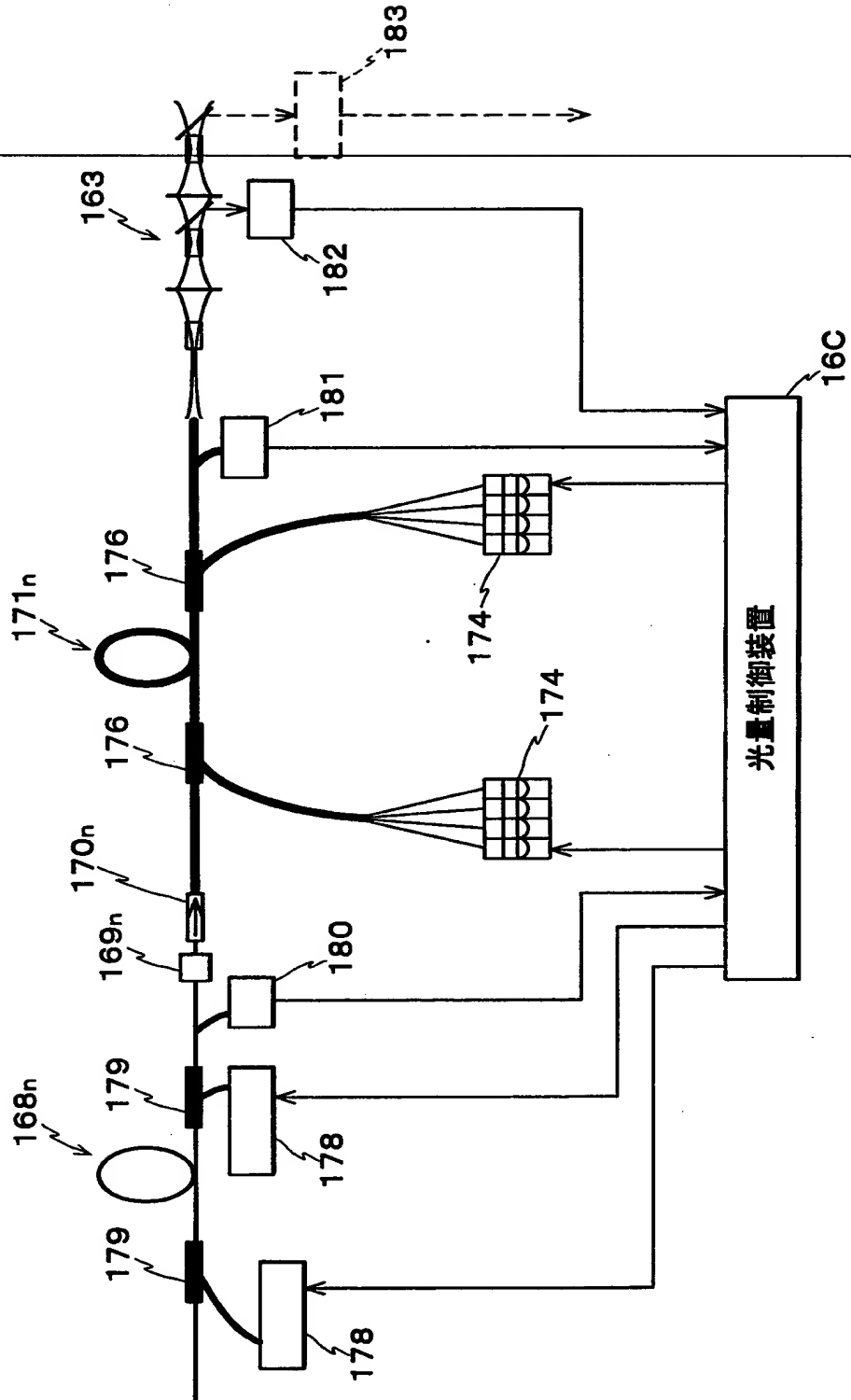
【図 3】



【図4】

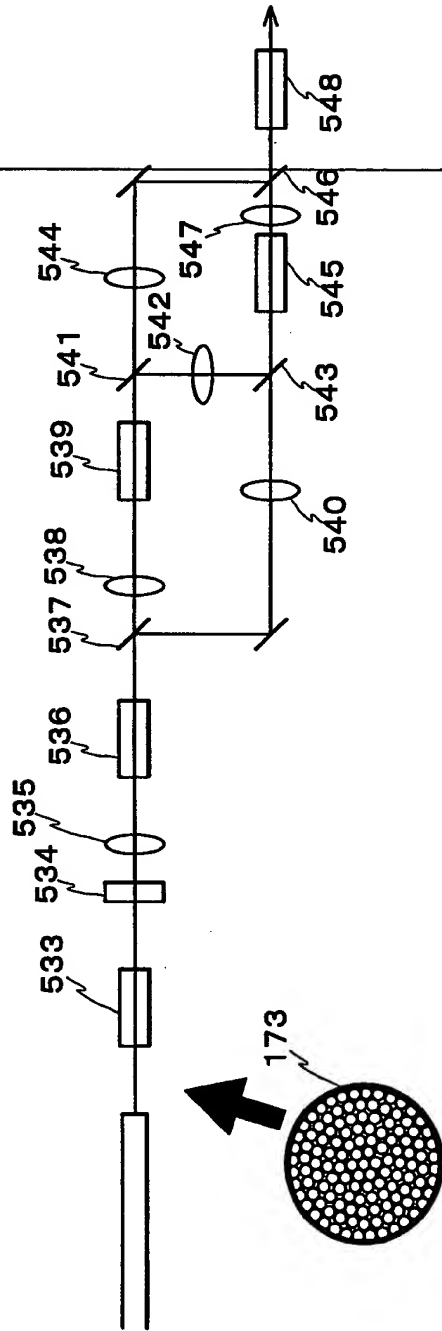


【図 5】

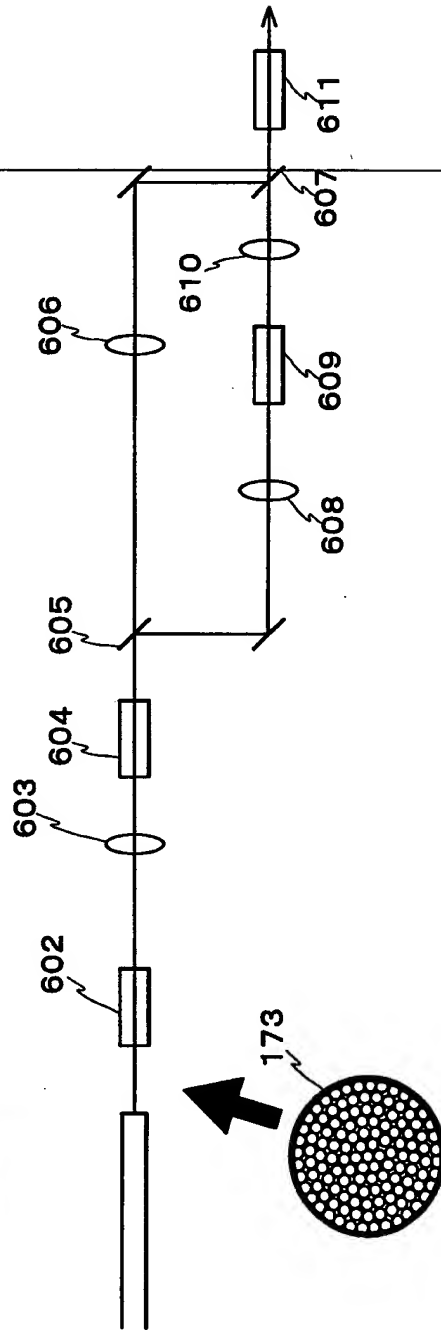


【図 6】

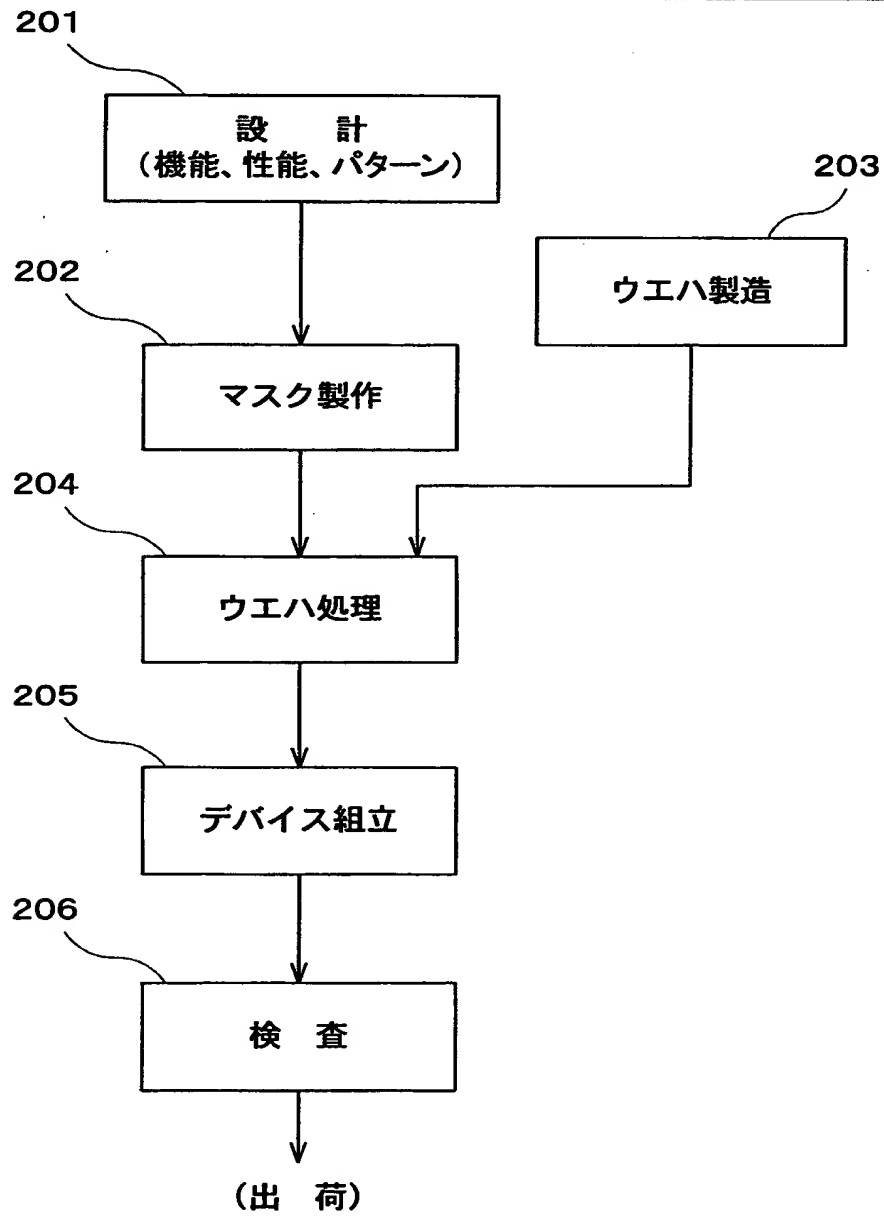
(A)



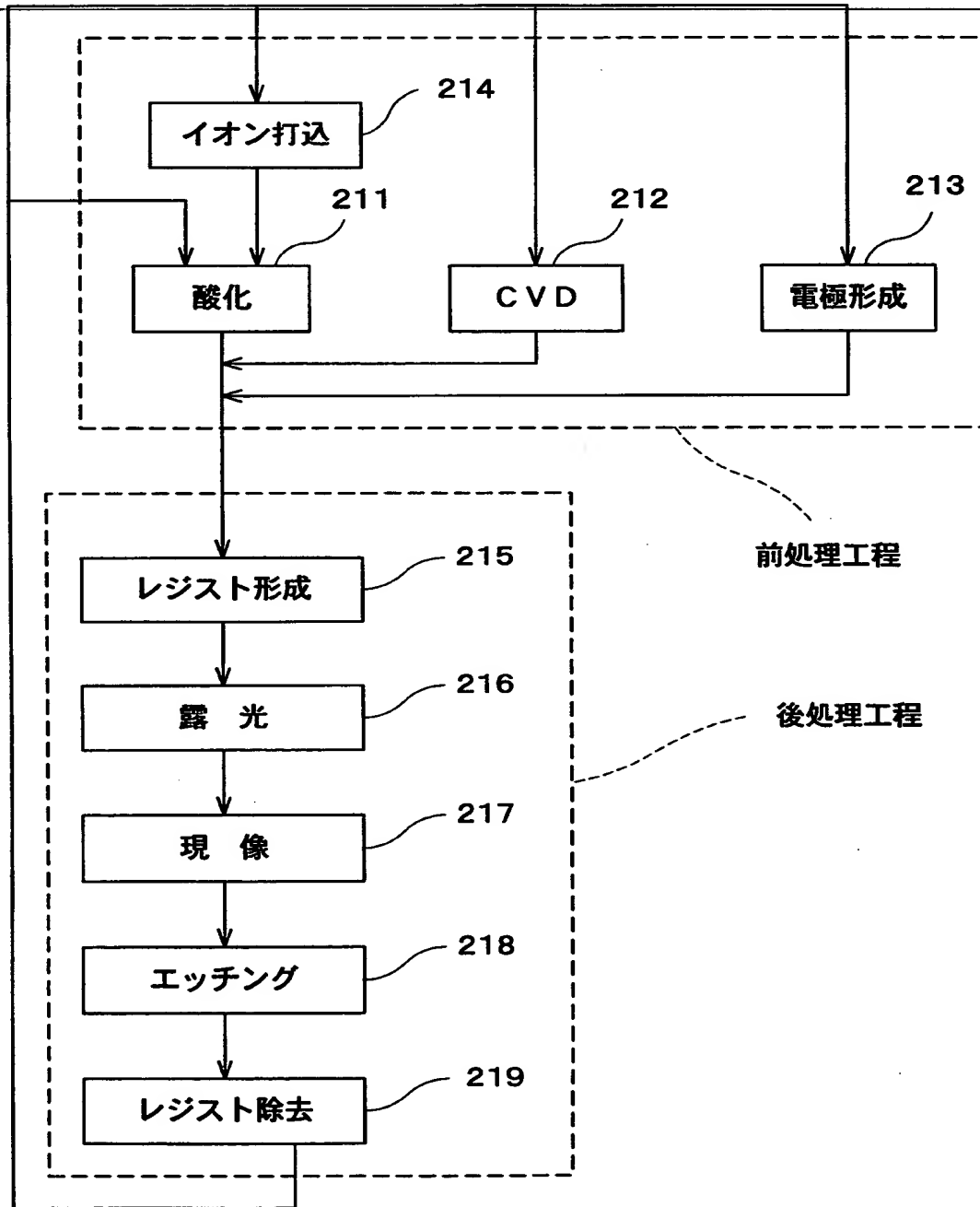
(B)



【図 7】



【図 8】





【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 レーザ光の中心波長を所定の設定波長に確実に維持することができる光源装置を提供する。

【解決手段】 メモリ内にビームモニタ機構 1 6 4 の検出基準波長の温度依存性のデータを含む温度依存性マップが記憶されている。そして、制御装置 5 0 では、吸収セル 1 6 5 の絶対波長に対してビームモニタ機構 1 6 4 の検出基準波長をほぼ一致させる絶対波長キャリブレーションを行うとともに、温度依存性マップに基づいて検出基準波長を設定波長に一致させる設定波長キャリブレーションを行う。このため、常に確実にビームモニタ機構の検出基準波長を設定波長に正確に設定することができ、これによりビームモニタ機構の雰囲気温度等が変動しても、それに影響を受けることなく、ビームモニタ機構を用いてレーザ光源 1 6 0 A の中心波長を所定の設定波長に確実に維持するような波長安定化制御が可能になる。

【選択図】 図 2

認定・付加情報

特許出願の番号	平成11年 特許願 第259615号
受付番号	59900891967
書類名	特許願
担当官	第五担当上席 0094
作成日	平成11年 9月16日

---

<認定情報・付加情報>

【提出日】	平成11年 9月13日
-------	-------------

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000004112]

---

1. 変更年月日	1990年 8月29日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都千代田区丸の内3丁目2番3号
氏 名	株式会社ニコン

